

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria de l'Energia**

# **ESTUDI DE CENTRAL ELÈCTRICA BASADA EN ENERGIES RENOVABLES**



**Memòria i Annexos**

<b>Autor:</b>	Vittorio Sbarbaro Sola
<b>Director:</b>	Joan Grau Barceló
<b>Departament:</b>	Departament de Mecànica de Fluids (MF)
<b>Convocatòria:</b>	Juny 2018



## **Resum**

L'era de la producció d'electricitat a partir de fonts basades en combustibles fòssils està arribant al seu fi. Entre les moltes noves tecnologies basades en fonts renovables que estan apareixent en els últims anys; la producció d'electricitat aprofitant l'energia interna de la Terra és clarament una opció a tenir en compte.

Aquest Treball de Final de Grau té com a objectiu el disseny d'una central geotèrmica amb cicle binari del tipus volcànic o central volcànica, anomenada d'aquesta forma per emprar un sistema de captació que realitza un intercanvi de calor amb la roca calenta existent a la perifèria d'una cambra magmàtica.

La modelització dels sistemes de captació energètica del subsòl realitzada amb els softwares COMSOL Multiphysics® i Excel duta terme en aquest projecte permet dimensionar la central volcànica, així com estudiar-ne els efectes sobre el terreny on es troba. El model dissenyat tracta les parts més representatives de la central en tres grans cicles d'aigua: El cicle de captació, el de Rankine i el de refrigeració.

Un cop realitzada la simulació i els càlculs de dimensionament de la central, els resultats obtinguts mostren una forta dependència amb el tipus de base rocosa existent a la localització de la central i amb la temperatura assolida a les capes més externes de la cambra magmàtica. Tanmateix, el propi estudi de viabilitat de la central de 49,35 MW plantejada demostra que la construcció d'aquesta infraestructura no només és possible i viable tècnicament sinó que també permet generar una potència molt elevada a partir d'una font neta com és la transferència de calor amb el subsòl.

## Resumen

La era de la producción de electricidad a partir de fuentes basadas en combustibles fósiles está llegando a su fin. Entre las muchas nuevas tecnologías basadas en fuentes renovables que están apareciendo en los últimos años; la producción de electricidad aprovechando la energía interna de la Tierra es claramente una opción a tener en cuenta.

Este Trabajo de Final de Grado tiene como objetivo el diseño de una central geotérmica con ciclo binario del tipo volcánico o central volcánica, llamada de esta forma por emplear un sistema de captación que realiza un intercambio de calor con la roca caliente existente en la periferia de una cámara magmática.

La modelización de los sistemas de captación energética del subsuelo realizada con los softwares COMSOL Multiphysics® y Excel llevada cabo en este proyecto permite dimensionar la central volcánica, así como estudiar sus efectos sobre el terreno donde se encuentra. El modelo diseñado trata las partes más representativas de la central en tres grandes ciclos de agua: El ciclo de captación, el de Rankine y el de refrigeración.

Una vez realizada la simulación y los cálculos de dimensionamiento de la central, los resultados obtenidos muestran una fuerte dependencia con el tipo de base rocosa existente en la localización de la central y con la temperatura alcanzada en las capas más externas de la cámara magmática. Sin embargo, el propio estudio de viabilidad de la central de 49,35 MW planteada demuestra que la construcción de esta infraestructura no sólo es posible y viable técnicamente sino que también permite generar una potencia muy elevada a partir de una fuente limpia como es la transferencia de calor con el subsuelo.

## **Abstract**

The era of producing electricity from fossil fuel-based sources is coming to an end. There are many new technologies based on renewable sources that are being developed currently, and among them is the production of electricity using the Earth's internal energy, which is clearly an option to take into account.

This Final Degree Project has the objective of designing a volcano's binary cycle geothermal power plant, or volcanic power plant, which gets its name from the way it uses an energy capture system to exchange heat with the hot rock at the periphery of a magmatic chamber.

Modelling the energy capture systems with the COMSOL Multiphysics® and Excel software as done in this project is necessary to carry out the dimensioning of the plant, as well as studying the effects on the surroundings and the soil where it is located. The designed model deals with the most representative parts of the plant in three large cycles of water: the capture cycle, the Rankine cycle and refrigeration cycle.

Once the simulations and dimensioning calculations of the plant have been performed, the results obtained showed a strong dependence on the type of rock that exists in the location of the plant and with the temperature reached in the outermost layers of the magmatic chamber. Nevertheless, the viability study of a proposed 49,35 MW volcanic power plant demonstrates that the construction of this infrastructure is possible and technically feasible. Hence, it's possible to generate clean electricity for a large power plant using heat transfer with the soil.

## Agraïments

Primer de tot, vull agrair a Joan Grau Barceló per haver ajudat i col·laborat en totes les etapes del projecte i pel seu suport donat durant el seu desenvolupament. La seva aportació ha sigut imprescindible per dur a terme aquest Treball de Final de Grau.

També vull fer menció a Ferran Ginette, director tècnic de Enviro Engineering, per haver-me ajudat en la cerca d'informació referent a aspectes geològics i característiques del terreny.

## Glossari

A continuació es mostren els principals símbols que apareixeran al llarg del projecte. Les unitats que es troben disposades estan en Sistema Internacional (S.I). Per fer els càlculs o donar els resultats s'han pogut fer servir altres unitats a les que apareixen en aquest glossari. Tanmateix, tots els símbols que apareixen en una equació són presentats en el text, així com de quina substància, element u objecte n'afecta o en depèn la magnitud en qüestió i les unitats amb les que s'ha operat.

### Símbols bàsics:

$C_{min}$	Mínim entre $C_{calent}$ i $C_{fred}$ ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$C_p = c$	Calor específic de l'aigua ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$C_1$	Tensor constant (adimensional)
$D$	Diàmetre (m)
$D_{seg}$	Distància de seguretat (m)
$E$	Energia (J)
$\dot{E} = \dot{Q} = P = N$	Energia per segon (J/s) = Potència (W)
$g$	Força de la gravetat ( $m/s^2$ )
$Gz_D$	Número de Graetz per un diàmetre de tub $D$ (adimensional)
$h$	Entalpia (J/kg)
$h$	Coefficient per transferència de calor per convecció i unitat d'àrea ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
$\bar{h}$	Coefficient per transferència de calor mitjà per convecció i unitat d'àrea ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
$H$	Profunditat en metres (m)
HR	Humitat relativa (%)
$J_0$	Funció de Bessel (adimensional)
$k$	Conductivitat tèrmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$L$	Profunditat on es troba la cambra magmàtica (m)
$m$	Massa que circula pel tub (kg)
$\dot{m}$	Cabal màssic (kg/s)
$Nu_D$	Número de Nusselt per un diàmetre de tub $D$ (adimensional)

$\overline{Nu}_D$	Número de Nussel mitjà (adimensional)
$p$	Pressió (Pa)
$P$	Perímetre (m)
$P_H$	Potència de l'intercanvi de calor amb el subsòl (W)
$P_O$	Potència de la bomba (W)
$P_{pou}$	Profunditat del pou (m)
$Pr$	Número de Prandtl pel fluid tèrmic (adimensional)
$\dot{q}$	Potència generada externament (W)
$Q_f = \dot{V}$	Cabal volumètric (m <sup>3</sup> /s)
$q''$	Flux mig de calor en funció d'unitat d'àrea (W/m <sup>2</sup> )
$r$	Radi del tub en U (m)
$Re_D$	Número de Reynolds per un diàmetre de tub $D$ (adimensional)
$Rt''$	Resistivitat tèrmica mitja per unitat d'àrea (K·m <sup>2</sup> /W)
$S$	Entropia (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
$S$	Superfície (m <sup>2</sup> )
$u_m$	Velocitat del fluid tèrmic circulant pel tub en U (m/s)
$U_m$	Coeficient de transferència de calor per bescanviador (W·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )
$v$	Velocitat del fluid (m/s)
$W$	Humitat absoluta (%)
$x$	Posició (m)
$t$	Temps (s)
$T = u$	Temperatura (K)
$\Delta T$	Increment de temperatura (K)
$\Delta T_{ml}$	Increment de la temperatura logarítmica (K)
$x, y, z$	Coordenades rectangulars (m)
$X$	Títol de vapor (%)



**Lletres Gregues**

$\alpha$	Difusivitat tèrmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\varepsilon$	Eficiència (%)
$\eta$	Rendiment (%)
$\theta$	Angle de posició específica (°)
$\lambda$	Angle en la funció de Bessel (°)
$\mu$	Viscositat absoluta del fluid tèrmic ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ).
$\rho$	Densitat ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

# Índex

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>IV</b>
<b>GLOSSARI</b>	<b>V</b>
<b>1. PREFACI</b>	<b>1</b>
1.1. Origen del treball .....	1
1.2. Valoració de les opcions plantejades .....	2
1.2.1. Central eòlica <i>offshore</i> .....	5
1.2.2. Central volcànica .....	9
1.2.3. Central hidro-solar .....	13
1.2.4. Tria de proposta .....	16
1.3. Coneixements necessaris .....	17
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>19</b>
2.1. Objectius del treball.....	19
2.2. Abast del treball.....	20
2.3. Planificació de les tasques per l'elaboració del treball .....	21
<b>3. TECNOLOGIES EXISTENTS APLICABLES</b>	<b>23</b>
3.1. Centrals geotèrmiques .....	23
3.1.1. Aplicabilitat a la central volcànica.....	26
3.1.2. Rang de potències habitual .....	27
3.1.3. Tecnologia de captació .....	28
3.2. Tecnologia de perforació.....	34
3.2.1. Perforació de pous multidireccionals .....	37
<b>4. CANVIS SEGONS EL TIPUS DE ROCA</b>	<b>42</b>
4.1. Canvis en la conductivitat tèrmica del terreny .....	43
4.1.1. Variació de $k$ en funció de la pressió de la roca .....	44
4.1.2. Variació de $k$ en funció de la temperatura de la roca .....	47
<b>5. ESTUDI DE VIABILITAT</b>	<b>52</b>
5.1. Modelització del procés de captació energètica .....	52

5.1.1.	Paràmetres bàsics del model de captació.....	53
5.1.2.	Modelització amb COMSOL Multiphysics® .....	67
5.2.	Disseny de la central .....	83
5.2.1.	Grup de captació .....	85
5.2.2.	Grup de transformació a energia mecànica.....	87
5.2.3.	Grup de transformació a energia elèctrica .....	107
<b>6.</b>	<b>NORMATIVES APLICABLES AL TREBALL .....</b>	<b>108</b>
6.1.	Normatives associades a l'estudi d'implementació .....	108
6.1.1.	Àmbit energètic .....	110
6.1.2.	Àmbit territorial.....	111
6.1.3.	Àmbit mediambiental.....	112
6.1.4.	Accés i connexió a xarxa .....	113
6.2.	Normatives associades a l'estudi de mercat .....	114
6.2.1.	Concepte retributiu del Mercat Energètic .....	115
6.2.2.	Concepte retributiu mitjançant el serveis d'ajust del sistema .....	116
6.2.3.	Concepte retributiu per mecanismes de capacitat.....	117
6.2.4.	Concepte retributiu específic .....	117
<b>7.</b>	<b>ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL .....</b>	<b>119</b>
7.1.	Impacte ambiental en la generació elèctrica .....	119
7.2.	Impacte ambiental en la instal·lació de la central.....	121
7.3.	Impacte ambiental per possibles averies i accidents .....	122
	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>125</b>
	<b>PRESSUPOST .....</b>	<b>127</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>133</b>



# 1. Prefaci

## 1.1. Origen del treball

L'ésser humà ha avançat com a espècie molt en molt poc temps (en l'escala cronològica de la vida a la Terra). El descobriment de les seves funcions motrius, l'aprenentatge de les qualitats pràctiques del foc, el sedentarisme gràcies al conreu i l'agricultura, la formació de societats organitzades, l'estudi de les lleis físiques que regeixen el planeta, la creació del comerç, la moneda i la construcció de ciutats artificials per dur a terme activitats dirigides a milers de persones, l'aparició de la indústria basada en la crema de combustibles fòssils, el descobriment i la implementació de l'electricitat...Tots aquests descobriments o canvis, que representen una infinitíssima part de tots els que hi ha hagut, marquen transcendentalment la vida humana tal com la coneixem. De fet, seria impossible viure amb les comoditats i els avantatges tecnològics dels que disposem diàriament sinó fos per tots els errors i encerts d'altres persones que ens precedien.

Indiscutiblement, aquests avanços en els coneixements de l'entorn que ens envolta, amb tot el que això implica, han repercutit de forma molt positiva en la forma de vida de la nostra espècie. L'augment de l'esperança de vida gràcies a la medicina, la disponibilitat d'energia tèrmica, aigua i electricitat a les nostres llars, la facilitat del transport humà, de material i d'informació són només alguns exemples. I la totalitat d'aquests avanços ha sigut i continuarà sent possible gràcies a l'aprofitament dels recursos naturals disponibles a la Terra.

En l'ús, l'extracció, la distribució, la manipulació i la transformació d'aquests recursos hi ha sempre un element comú, un element que tenim inert en nosaltres mateixos i que ens regeix junt a tot el que ens envolta: L'energia. La pròpia respiració i alimentació animal són mètodes de captació d'energia necessaris pel funcionament dels organismes. Fins i tot els àtoms considerats com la unitat indivisible estan units per forts enllaços energètics. El domini i enteniment de l'energia, és per tant de vital importància.

Ja esmentada anteriorment, l'electricitat suposa un element indispensable i un punt clau de partida en els avanços actuals. El fet de disposar d'un medi de transport d'energia perfectament conegut i de fàcil implementació, amb els recursos disponibles, és imprescindible. Però per disposar ininterrompudament d'aquest recurs del que s'acaba d'explicar la seva importància en la societat humana, calen fonts d'alimentació que en permetin la generació. I aquest és un dels àmbits d'estudi de màxima preocupació del Enginyers Energètics i els que estem estudiant per ser-ho. Per aquest motiu vaig voler realitzar un Treball de Final de Grau enfocat cap una central d'alta potència per a la producció d'energia elèctrica.

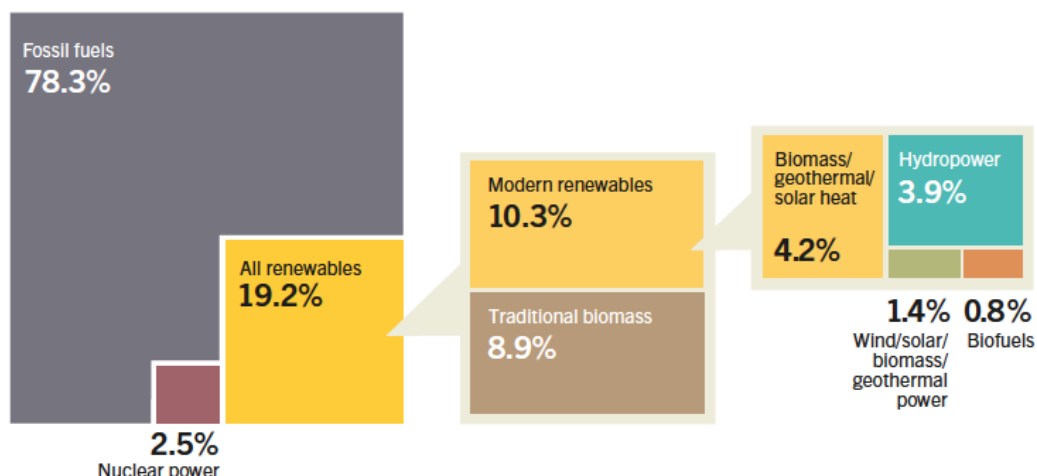
Actualment l'absència de perjudici o impacte negatiu sobre el medi ambient en la generació d'electricitat és tema d'estudi i debat. Ens interessa a tots (com a espècie, interessos econòmics a part) que la transformació de fonts primàries d'energia a fonts secundàries, fonts finals i fonts útils (segons les definicions del "*Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*" (1)) sigui el més neta possible per evitar problemes de primer ordre com el canvi climàtic o l'escalfament global.

Tenint en compte que des del començament aquest Treball de Final de Grau tenia com a objectiu l'estudi d'una central d'alta potència, es restringeix el ventall de possibilitats a les d'una central basada en una font d'energia renovable. Partint d'aquesta premissa, es disposa d'un gran nombre de tecnologies per ser objecte d'estudi. A més, considero que és especialment interessant l'estudi d'una central no estandarditzada, és a dir, que presenti reptes en l'anàlisi dels elements necessaris per instal·lar-la en un lloc específic del planeta ja que no estan comunament estesos. Després de valorar moltes opcions, n'hi ha tres que finalment es varen ajustar perfectament als meus requeriments i expectatives per al desenvolupament d'aquest projecte, que són:

1. Central eòlica *offshore*.
2. Central volcànica.
3. Central hidro-solar.

## 1.2. Valoració de les opcions plantejades

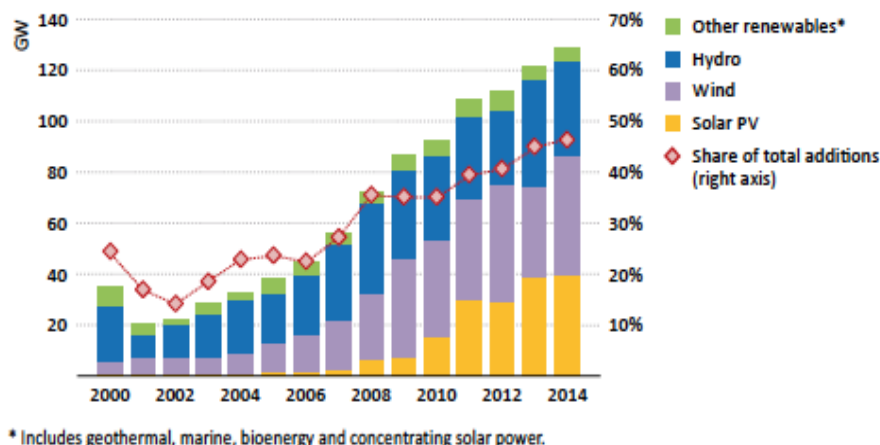
A continuació es fa una breu introducció al món de les energies renovables per situar les tres central plantejades dintre dels grans blocs de producció d'energia segons la font energètica de la que depenen. Es plantegen les opcions i quins serien els objectius a grans trets de cada estudi. Les tres propostes formen part d'un grup que cada vegada té més impacte sobre el consum total d'energia final al món; les energies renovables. Mirant el "*Global Status Report*" del REN21 sobre l'energia renovable de l'any 2016 (2), vist que encara no tenim accés al del 2017, es pot observar l'impacte de cada font d'energia sobre aquest consum total per l'any 2014, adjuntat a la Figura 1.1.



**Figura 1.1.** Impacte de l'energia renovable en el consum d'energia final al món, l'any 2014. (Font: "Renewables 2016 Global Status Report" del REN21 (2).)

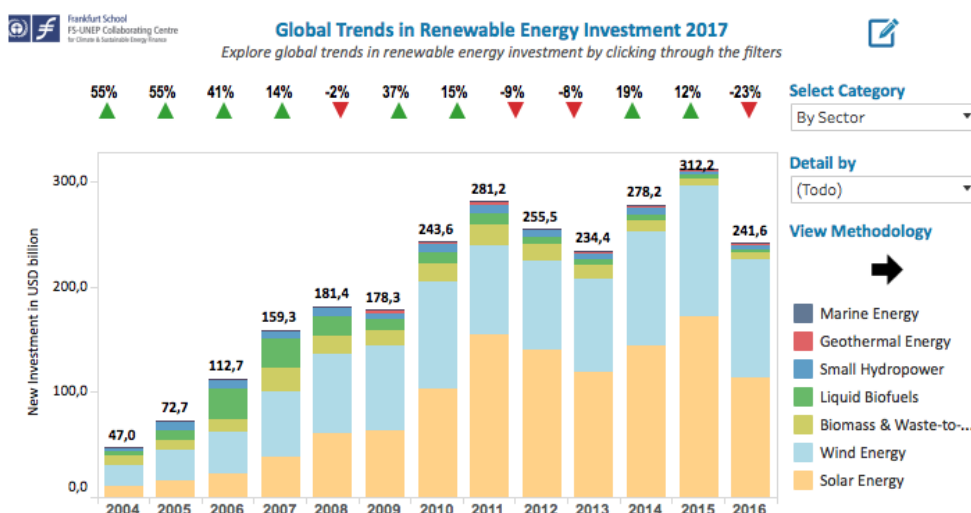
Òbviament els percentatges mostrats a la Figura 1.1 s'estimen sobre el consum total d'energia, no únicament la destinada a l'obtenció d'electricitat. Els combustibles fòssils segueixen sent amb diferència la font d'energia principal per la humanitat, que en depèn en més de tres quarts parts de l'energia que necessita. De totes formes el segon bloc més gran ja correspon el d'energies renovables, amb un pes d'aproximadament el 19,2%. D'aquest percentatge adherit a les renovables, gairebé la meitat, un 8,9% sobre el total d'energia, correspon a la "biomassa tradicional", entesa com la crema de matèria orgànica que succeeix en la seva majoria a àrees rurals de països en vies de desenvolupament; usada sobretot per cuinar i escalfar. El 10,3% restant inclou el grup en el que s'inclouen les tres centrals anteriors, i en el cas de la central volcànica o la hidro-solar s'inclourien si existissin i estiguessin operatives.

Cap destacar, analitzant el percentatges anteriors, que tot i els esforços realitzats l'impacte de les energies renovables en el consum d'energia final encara està molt lluny del desitjable. Per aquest motiu és necessari seguir estudiant nous mètodes d'obtenció d'energia neta. Seguint l'evolució de la instal·lació de centrals elèctriques d'energia renovable respecte altres tipus de centrals (veure Figura 1.2), s'aprecia clarament com de no suposar ni un 20% de la potència anual instal·lada els anys compresos entre el 2000 i 2005 en suposa un 64,1% l'any 2014, segons el "World Energy Outlook 2016". És important seguir la tendència clarament ascendent de la instal·lació d'aquest tipus de tecnologies.



**Figura 1.2.** Potència anual afegida per tipus de tecnologia renovable (GW) i percentatge sobre la potència instal·lada total al món, del 2000 al 2014. (Font: “World Energy Outlook” (3)).

La Figura 1.2 exemplifica molt bé la integració de tecnologies basades en fonts renovables un cop ens adonem dels efectes altament perjudicials dels combustibles fòssils en el medi ambient. La instal·lació de panells fotovoltaics passa de ser gairebé inexistent al 2005 a ser d'un 19,9% al 2014, superada únicament com a energia renovable pels aerogeneradors eòlics amb un 23,2%. Les centrals hidràuliques suposen el tercer gran bloc de tecnologies renovables instal·lades any rere any, especialment per la construcció de noves centrals a Xina i Sud Amèrica. En termes econòmics la Figura 1.3 exemplifica molt bé l'evolució del capital destinat a aquestes tecnologies renovables del 2004 al 2016 (excloent les centrals hidràuliques ja que el catalogador de centrals d'IRENA, (4) , no considera de nova creació).



**Figura 1.3.** Inversió total en tecnologies renovables del 2004 al 2016. (Font: resourceirena.irena.org (4))



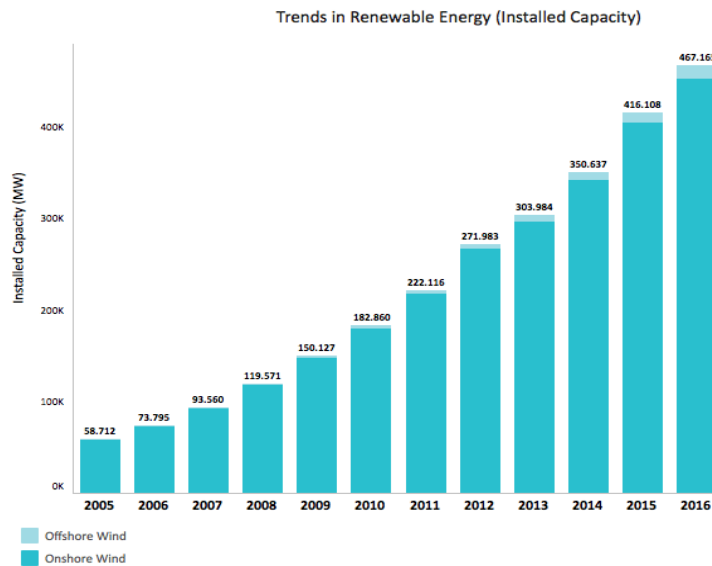
Tecnologies molt interessants com l'energia geotèrmica, la marina o els panells solars de concentració tèrmica suposen realment una part molt petita de les noves tecnologies renovables afegides els últims anys. Tanmateix, l'estudi d'aquestes és molt important si es volen trobar noves tecnologies que permetin realitzar una transició energètica per deixar de dependre dels combustibles fòssils. De fet, les tres propostes anteriors (central eòlica *offshore*, central volcànica i central hidro-solar) no formen part d'un grup que tingui un gran impacte sobre la generació elèctrica mundial. La central volcànica està en fase d'estudi, la central hidro-solar no existeix i el parc eòlic *offshore* suposa una part realment petita en comparació a la instal·lació d'aerogeneradors *onshore* (veure la **Figura 1.4** de l'anàlisi de la central eòlica *offshore*).

A continuació s'analitzarà l'enfocament que s'empraria en l'estudi de cadascuna d'aquestes tres tecnologies esmentades anteriorment fent una breu introducció a l'àmbit d'aplicació que suposaria cadascuna de les tres opcions plantejades.

### 1.2.1. Central eòlica *offshore*

Primerament, cal introduir la tecnologia. Quan es parla de centrals eòliques *offshore* es fa referència a parcs eòlics situats fora de la xarxa elèctrica de distribució, és a dir, al mar o als oceans. És la tecnologia eòlica que fins al moment ha tingut menor impacte en la potència instal·lada per la generació d'electricitat emprant el vent com a font d'energia. Comparant la capacitat de 453,08 GW disponibles a parcs eòlics *onshore* els 14,085 GW disponibles a parcs eòlics *offshore* en són una petita part. De totes formes el 2005 hi havia una capacitat de 58,028 GW eòlics en total; fet que exemplifica molt bé la ràpida instal·lació d'aquestes tecnologies i com pot variar en els propers anys tenint en compte que el recurs eòlic és molt més abundant als oceans que a les plataformes terrestres. La **Figura 1.4** mostra aquesta evolució en quant potència global instal·lada es refereix pels dos tipus de centrals eòliques.

## Wind Energy Data

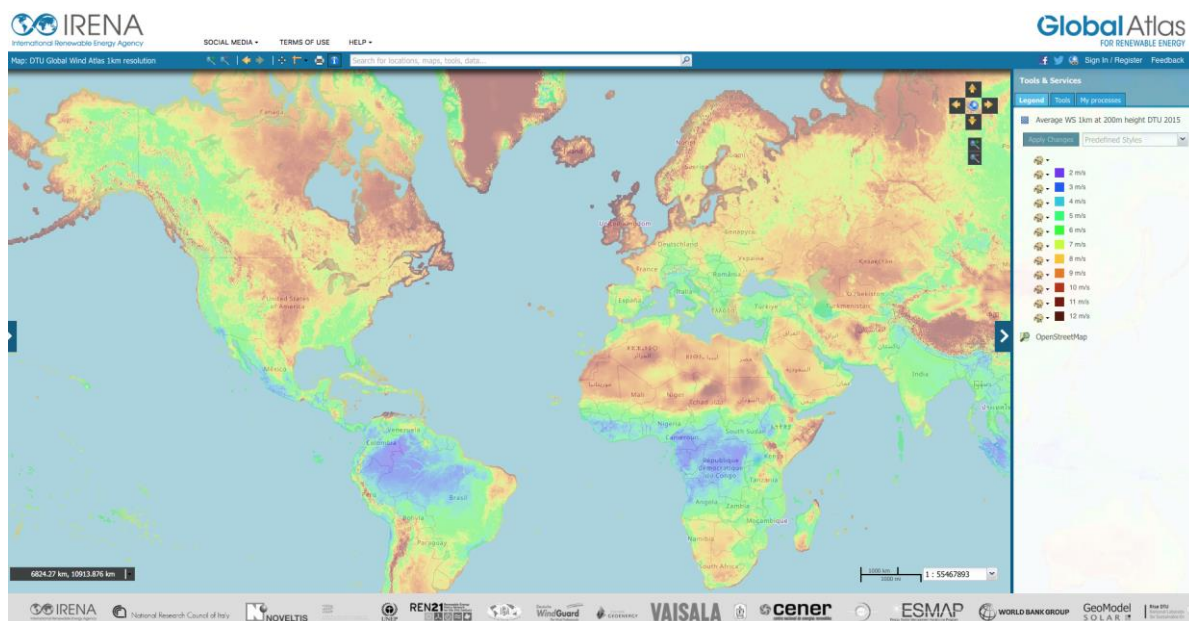


**Figura 1.4.** Potència eòlica *onshore* i *offshore* total instal·lada al final de cada any (2005-2016). (Font: irena.org (5)).

Segons les dades facilitades al “*Global Status Report*” del REN21; del 2012 al 2016 es va quadruplicar la potència instal·lada de parc eòlics *offshore*. L’any que marca un punt de referència en aquesta tecnologia és el 2015; Alemanya, Gran Bretanya, Xina i Holanda són en aquest ordre els responsables de la instal·lació de més de 3,4 GW en aquest any (dels què Alemanya en representa més de dos terços). Al 2016 s’implementen 2,8 GW més. En el mateix document es destaca el gran nombre de projectes de nova creació de parcs eòlics a l’oceà que a dia d’avui es troben en fase construcció o d’estudi per realitzar-los. Estats Units, Dinamarca i Índia ja han desenvolupat els seus primers projectes.

L’avantatge realment interessant de situar els parcs eòlics al mar en comptes de terra ferma és la major abundància de recurs eòlic (a part que no interfereixen paisatges ni la vida humana en les zones on s’instal·len). L’Agència Internacional d’Energies Renovables (IRENA, per les seves sigles en anglès) i la Universitat Tècnica de Dinamarca (DTU), han publicat el que ells mateixos anomenen *Global Wind Atlas*. Aquest programa que es pot descarregar o simplement usar de forma gratuïta a (6), permet obtenir les dades de la velocitat mitja del vent a tota la superfície terrestre i fins a 30 km a mar obert des de la costa. A més a més, per primera vegada un programa semblant ofereix una resolució de 1 km com a màxim; realment molt ja que cobreix tot el planeta (exceptuant mars i oceans en zones llunyanes a la costa).

Si bé es cert que en cas de dur a terme un TFG sobre una central *offshore* a més de 30 km de la costa més propera caldria trobar programes de dades eòliques més específics i de pagament, el *Global Wind Atlas* permet trobar fàcilment quines són les zones amb major recurs eòlic. La Figura 1.5 mostra les zones amb major potencial al món (seguint el codi de colors apreciable en la mateixa imatge). El programa no permet allunyar més la imatge, motiu pel qual no s'ha inclòs Oceania i la costa est d'Àsia (ambdues amb gran potencial eòlic).



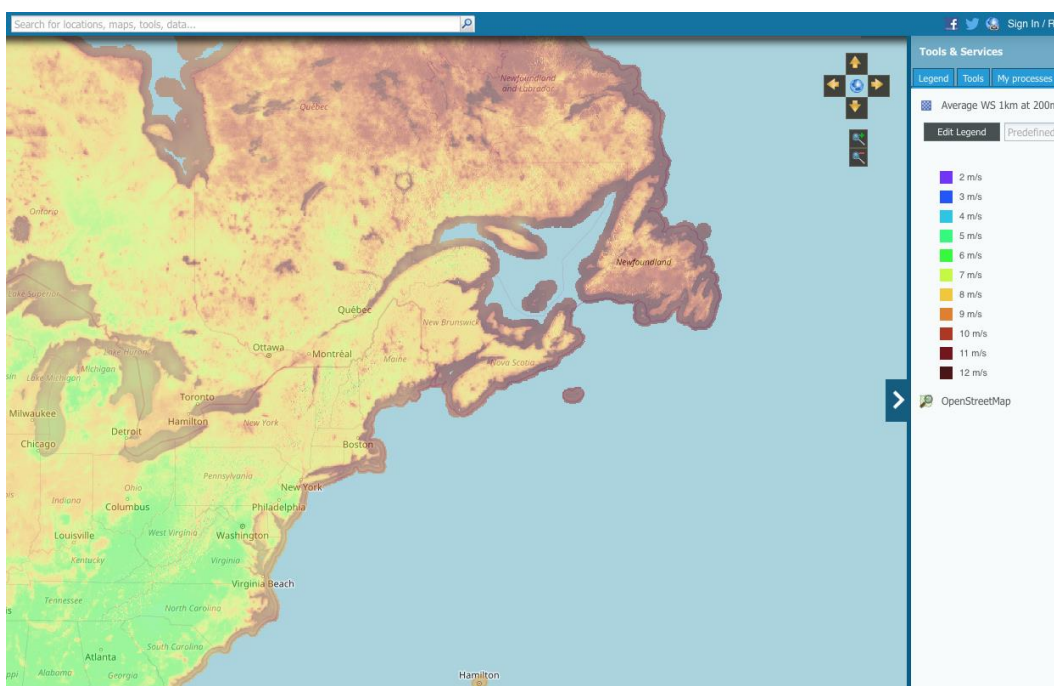
**Figura 1.5.** Distribució del recurs eòlic global (m/s). (Font: irena.masdar.ac.ae (6))

A la Figura 1.5 s'observa com les zones en color marró fosc són les que tenen una major mitja de la velocitat del vent (per llegir millor els valors de la llegenda veure la Figura 1.6). Tanmateix, per la tria de la ubicació d'una central eòlica *offshore* el punt clau és la velocitat del vent a la costa. En la mateixa imatge s'aprecia resseguint les costes amb aquest mateix color marró quines són les ubicacions òptimes. Islàndia, Gran Bretanya, el sud de Groenlàndia i la costa nord est d'Estats Units i Canadà resulten una localització excel·lent per un parc eòlic d'aquest tipus.

Un altre factor a tenir en clau és l'ús que es pugui donar en aquesta central. Islàndia té recurs eòlic en abundància, però el cens és realment baix i amb que s'ocupés una petita part de la costa disponible amb una central eòlica *offshore* seria més que suficient per subministrar electricitat a tot el país. A dia d'avui, i per raons evidents, Gran Bretanya és el conjunt de països amb major potència instal·lada de parcs eòlics *offshore* (superant recentment a Alemanya). Hi ha molt projectes d'aquesta tecnologia en desenvolupament i s'haurà de tenir en compte en un futur no molt llunyà com una de les seves principals fonts d'energia. Però hi ha una zona molt desaprofitada on gairebé no s'ha fet cap projecte

d'aquest tipus, on precisament hi ha grans ciutats que tenen un gran requeriment energètic i afortunadament es troben a la costa i en una ubicació perfecta.

Ens referim a Nova Anglaterra, a la costa est dels Estats Units; Boston, Nova York, Filadèlfia...són algunes de les grans ciutats costaneres que es podrien afavorir d'aquesta tecnologia ja que precisament aquella zona és una de les que té major recurs eòlic del planeta. Per aquest motiu una de les tres propostes d'aquest TFG seria dissenyar una gran central eòlica *offshore* en aquesta localització, amb l'objectiu d'explotar el vent en un conjunt d'Estats Americans que el desaprofiten, i poder abastir les grans ciutats que allà s'hi troben. La Figura 1.6 permet observar la regió en qüestió des d'una escala menor.

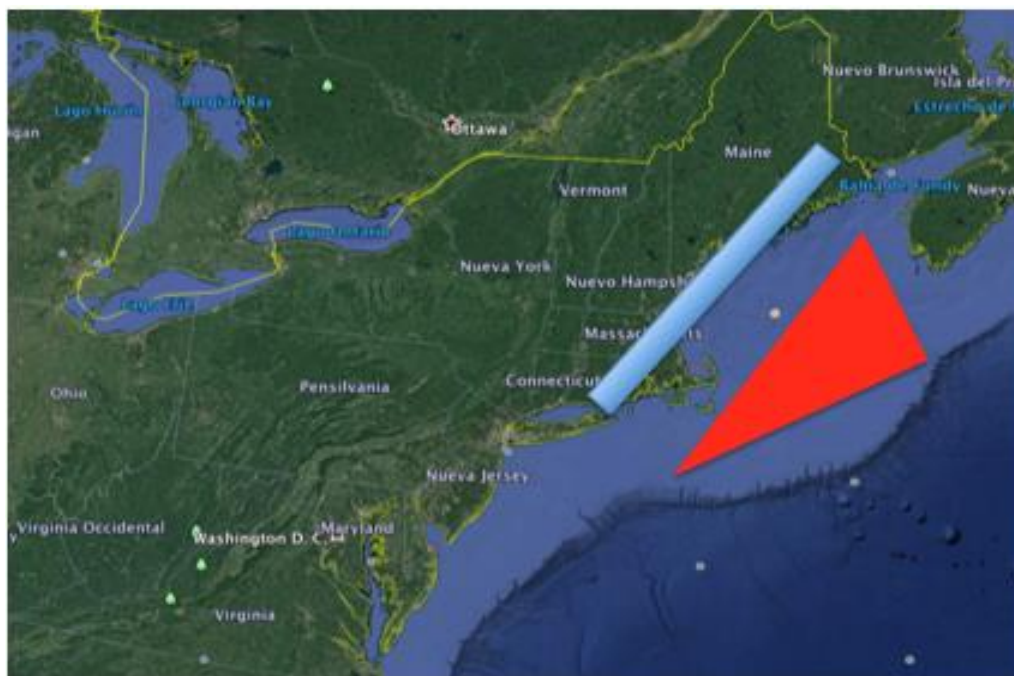


**Figura 1.6.** Visual de la costa d'implementació de la central estudiada. (Font: irena.masdar.ac.ae (6)).

Es demostra així, que el recurs eòlic és llargament abundant i suficient per triar aquesta ubicació com a ideal. L'existència d'aquestes grans ciutats a prop de la costa són un al·licient més per intentar-les alimentar amb una font renovable; i un parc eòlic de grans dimensions les podria cobrir energèticament en la seva totalitat. Ara bé, cal veure si les característiques geogràfiques d'aquesta part de l'oceà permeten la instal·lació de les turbines eòliques.

La resposta és sí. A més de tots els avantatges esmentats anteriorment, aquesta part d'oceà Atlàntic propera a la costa est de EEUU es troba just a sobre d'una plataforma terrestre enfonsada per una capa d'aigua d'entre 200 i 300 m de profunditat. Això significa que en cas de voler cimentar els aerogeneradors en el fons marí s'estalvien milions de dòlars en costos en comparació a moltes altres

ubicacions amb recurs eòlic similar però amb molta més profunditat del fons marí. La Figura 1.7 mostra una imatge d'aquesta plataforma que és una elongació del continent americà, el rectangle blau són les zones on es troben les ciutats que es podrien alimentar i el triangle vermell representa una ubicació aproximada d'on es podria situar aquesta maga-central eòlica.



**Figura 1.7.** Possible ubicació de la central estudiada i fotografia de satèl·lit d'aquesta (Font: earth.google.es (7)).

Tanmateix, l'últim fet esmentat de la profunditat marina podria perdre importància amb els nous models de turbines que actuen com a boia, evitant la gran despesa d'ancorar-les al fons marí. De totes formes és millor tenir disponibles ambdues opcions vist que a dia d'avui la majoria de les instal·lacions encara es fan cimentant-les.

Possible objectiu del TFG sobre la central eòlica *offshore*: Dissenyar una central eòlica a gran escala destinada a cobrir la demanda (a màxima potència) de totes les grans ciutats de la zona de Nova Anglaterra, EEUU. Calcular la despesa necessària i lidiar amb els possibles problemes tècnics d'instal·lació de les turbines a oceà obert.

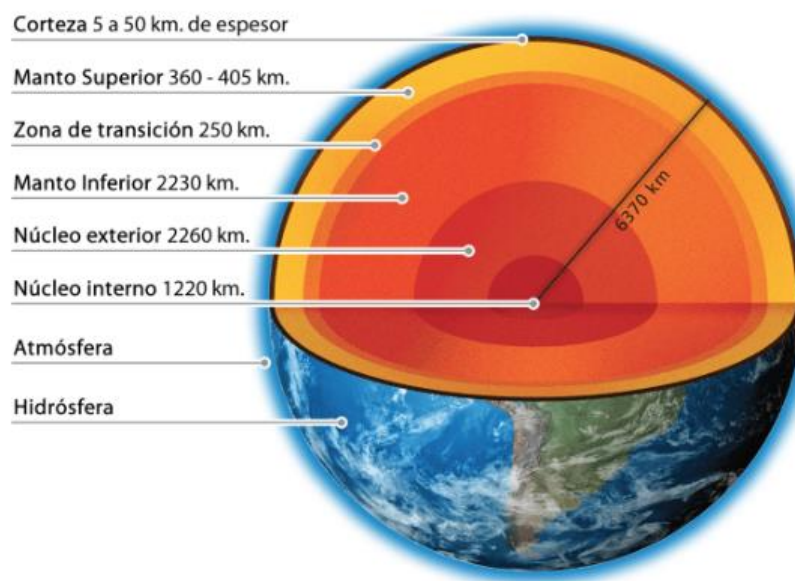
### 1.2.2. Central volcànica

Quan es parla d'energies renovables sempre s'esmenta l'energia geotèrmica com aquella que prové d'intercanvis de temperatura amb el sòl. Al mateix informe "*Renewables 2016 Global Status Report*" del REN21 es destaca que al món només hi havia instal·lada una potència de 13,2 GW contant centrals geotèrmiques i petites instal·lacions. La majoria es troben a Estats Units, Filipines i Indonèsia

en aquest ordre. També es destaca que hi ha tres tipus de jaciments geotèrmics; d'aigua calenta (en aqüífers subterranis), secs (on és el subsòl qui es troba a alta temperatura permetent un intercanvi) i els guèisers. Del jaciments magmàtics no se'n fa ni menció.

Curiosament, l'energia interna de la Terra permet alimentar energèticament la humanitat com a font única i molt probablement fins l'extinció de l'espècie (supera els  $10^{31}$  J emmagatzemats). Només cal observar el seu nucli; té un radi d'aproximadament 3481 km (és a dir, semblant al radi del planeta Mart) i es troba compost per un nucli extern d'uns 2260 km de majoritàriament ferro i níquel en estat líquid i un nucli intern d'uns 1221 km amb aquests dos materials en estat sòlid amb altres elements com iridi, plom i titani (es creu que la proporció és de forma aproximada 70% Fe i 30% Ni). Les temperatures que s'assoleixen al nucli poden superar els 6700 °C. (8)(9).

Òbviament un accés segur en aquestes capes de la terra permetria extreure energia mitjançant intercanvis de calor, suficients per satisfer sobradament la demanda mundial d'energia. Per desgràcia, no disposem de la tecnologia, els coneixements, ni els materials necessaris per realitzar aquests intercanvis de forma segura i la pròpia idea resulta impossible. L'ésser humà només ha sigut capaç d'extreure energia de la capa terrestre més externa; l'escorça terrestre (veure la Figura 1.8).

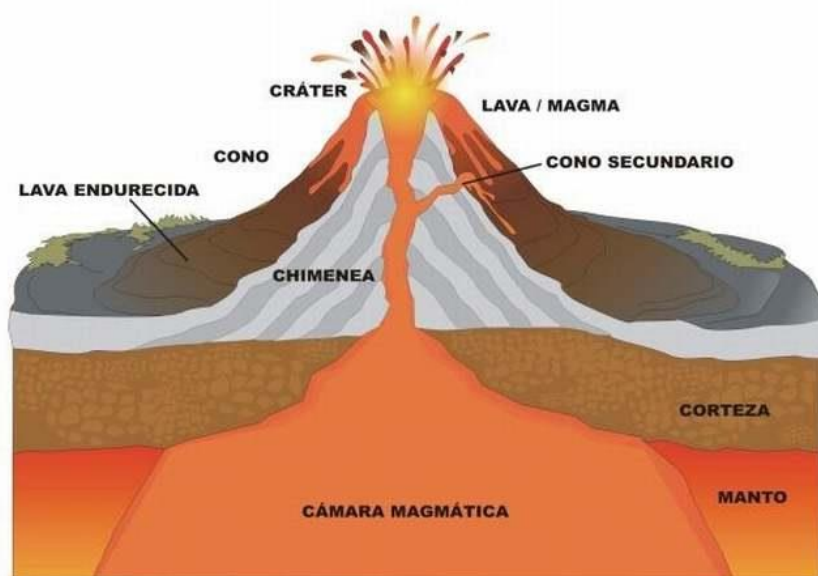


**Figura 1.8.** Capes de la Terra i longitud aproximada d'aquestes. (Font: magneticafm.com (10)).



Tenint en compte que de les capes de la Figura 1.8, que mostra la geosfera, només podem accedir com a espècie a les capes més externes (que tenen uns 50 km de longitud fins el mantell superior i uns 10 km des de les zones més profundes dels oceans); per treure profit de l'energia interna de la Terra i de les altes temperatures de les capes més profundes és necessari trobar conseqüències d'aquestes a l'escorça. I la conseqüència més directa a l'escorça és l'aparició de volcans.

La formació de volcans es deu a l'acumulació de capes sobreposades de magma refredat i posteriorment cristal·litzat formant el que s'anomena roques ígnies, degut a episodis d'erupcions volcàniques: On hi ha un ascens del propi magma i de gasos provinents de l'interior de la Terra. Si les roques ígnies apareixen a l'interior de la terra (en capes interiors a l'escorça) s'anomenen roques plutòniques o intrusives, i si apareixen a la superfície el magma que les ha format es coneix com a lava i les roques formades al refredar-se aquest són anomenades volcàniques (11). La part interessant del procés de creació dels volcans és l'aparició de cambres magmàtiques que entren a l'escorça des del mantell superior. La Figura 1.9 mostra aquesta entrada del magma a l'escorça i l'estructura bàsica d'un volcà.



**Figura 1.9.** Estructura bàsica d'un volcà. (Font:lidefer.com (12)).

Les cambres magmàtiques es caracteritzen per tenir una cobertura de roca plutònica amb magma (fos) en el seu interior, a mode de piscina. Es troben al mantell terrestre, però la pròpia erosió deguda a les erupcions volcàniques les permet entrar en l'escorça terrestre creant zones de subducció; permetent que arribin a estar properes a la superfície (entre 1 km i 10 km de profunditat des de la seva part superior). Els supervolcans apareixen quant cambres d'alta activitat eruptiva degut a la

orogènesis col·lapsen la via de sortida del magma, generant una depressió terrestre amb activitat magmàtica a sota. (12).

S'ha explicat tot aquest procés de formació dels volcans i les cambres magmàtiques per entendre d'on prové l'energia que es faria servir en aquesta proposta de temàtica per aquest TFG: La central volcànica. La revista NBC va publicar recentment el desenvolupament d'un projecte portat per la NASA basat en l'aprofitament del magma per generar una gran quantitat d'energia alhora que es redueix l'imminent risc d'erupció d'un supervolcà actiu; el de Yellowstone. La seva idea consisteix en construir una central elèctrica que mitjançant un cicle de Rankine generi electricitat a partir de l'energia provinent de l'intercanvi de calor entre aigua i la roca plutònica en contacte amb la cambra magmàtica del volcà. D'aquesta forma la seva idea és refredar el magma que degut a la seva activitat es manté entre 700 °C i 1300 °C (depenent de la cambra magmàtica (11)) alhora que es produeix una gran quantitat d'electricitat. Al refredar-se el magma superior ens uns pocs milers d'anys, depenent del volum de magma calent de la cambra en qüestió, s'esmenta a l'article que s'acabaria "amb el risc d'una erupció devastant" per part dels volcans on es situï una central d'aquest tipus. L'article es pot trobar al següent enllaç:

<https://www.nbcnews.com/mach/science/scientists-hatch-bold-plan-save-planet-supervolcano-ncna799166>

L'article destaca que en el cas de Yellowstone "Les evidències geològiques suggereixen que fa una erupció massiva cada 600.000 a 800.000 anys. La més recent va succeir aproximadament fa 640.000 anys". Per aquest motiu el període d'extracció d'energia és curt si el comparem amb el que triga en fer erupció, i pretén evitar grans riscos a llarg termini. (13).

La ubicació triada per estudiar una central d'aquest estil pot ser qualsevulla que tingui un volcà actiu i dades conegudes sobre la situació de cambra magmàtica i el volum de magma que hi ha al seu interior. Es va decidir que si s'optava per fer el TFG sobre una central volcànica es situaria a les Illes Canàries, vist que imaginava que els centres geològics d'estudi d'activitat volcànica de Tenerife o Lanzarote em podrien facilitar més fàcilment aquestes dades que els d'altres països estrangers. Tanmateix, s'ha acabat fent aquest projecte i no s'han acabat trobant les dades i s'ha realitzat un projecte amb les característiques exemplificades d'una cambra magmàtica estàndard. La Figura 1.10 és una imatge de parc de Timanfaya, Lanzarote. A continuació es comenten els objectius.





**Figura 1.10.** Fotografia del parc de Timanfaya, Lanzarote. (Font: [españaescultura.es](http://españaescultura.es) (14)).

Possible objectiu del TFG sobre la central volcànica: Dissenyar una central volcànica que permeti extreure l'energia necessària per desactivar els volcans actius més perillosos de les Illes Canàries alhora que s'extreu l'energia necessària per cobrir la demanda de les Illes. Calcular la despesa requerida per construir la central i lidiar amb els possibles problemes tècnics d'instal·lació de totes les parts d'aquesta: Des dels materials dels tubs d'intercanvi de calor amb el magma fins la tria de les turbines del cicle de Rankine. Aquests objectius van canviar pels que es veuen en l'aparat 2.2 d'aquest projecte.

### 1.2.3. Central hidro-solar

L'última proposta a valorar com a candidata per la realització d'aquest TFG és la d'una central hidro-solar. L'energia hidroelèctrica és la major font d'energia en termes de capacitat instal·lada que no provingui de la crema d'algun combustible (a dia d'avui). Només al 2015 es van instal·lar 28 GW segons el *"Renewables 2016 Global Status Report"* del REN21; arribant així a una potència de 1064 GW instal·lats en tot el planeta. Xina, Brasil, EEUU i Canadà són en aquest ordre els màxims generadors d'electricitat mitjançant centrals hidroelèctriques. La Figura 1.11 mostra una central hidroelèctrica. Països com Xina i Brasil estan a dia d'avui construint una gran quantitat de centrals d'aquest tipus. Aquestes dades permeten entendre que la tecnologia està molt estesa i és perfectament coneguda; literalment utilitzes l'energia potencial de l'aigua emmagatzemada per deixar-la sortir de la pressa i generar electricitat al pas d'aquesta per una turbina-alternador. Però, es podria evaporar aquesta aigua en comptes d'enviar-la de tornada al riu?



**Figura 1.11.** Exemple de central hidroelèctrica. (Font: es.dreamstime.com (15)).

Bé, la resposta a aquesta pregunta és evident i és sí, aquesta aigua podria anar parar a un bescanviador de calor i ser evaporada mitjançant un intercanvi amb algun fluid tèrmic provinent, per exemple, d'un camp solar. Ara bé, caldria veure si realitzar aquesta acció realment pot aportar un benefici real a la central i millorar el rendiment global de les dues instal·lacions per separat. Aquí és on entra en joc aquesta proposta de combinar una central hidràulica convencional amb col·lectors solars tèrmics cilindro-parabòlics.

Com s'explica més endavant, la idea està pensada per països amb poca aigua i abundant recurs solar, que en la majoria de casos resulta ser complementari. D'aquesta forma es pot aconseguir tenir un cicle d'aigua tancat i regulable que pugui tenir efectes positius en els sistemes de regadiu i el subministrament d'aigua local i alhora ser una central productora d'energia elèctrica i tèrmica. La part bona de fer aquest estudi és que fins ara no s'ha fet, o no he sabut trobar després d'una llarga cerca informació al respecte: En cas de trobar alguna millora significativa de les centrals hidràuliques convencionals en l'efecte d'aquestes en països com els descrits (fet que no es pot descartar ni confirmar fins fer-ne un estudi) seria una aportació a tenir en compte sobre els possibles usos d'una central hidroelèctrica.

S'ha comentat que la tecnologia de les centrals hidroelèctriques és altament coneguda, per altre banda si es compara amb la tecnologia de concentració solar (CPS per les seves sigles en anglès; "*Concentrating Solar Power*") s'observa com aquesta és molt més nova i la seva potència instal·lada és molt menor respecte els 1064 GW de centrals hidràuliques: 4,8 GW a tot el món segons el REN21.

Malgrat això, la tecnologia està desenvolupada (col·lectors cilindro-parabòlics, central de concentració a torre, concentradors Fresnel...), és coneguda, té un bon mètode d'emmagatzematge com és la utilització de sals tèrmiques i permet la generació de suficient energia per l'ús que es desitja estudiar. La Figura 1.12 mostra un conjunt de concentradors de tipus Fresnel (fileres de miralls plans que focalitzen la radiació solar en un tub superior).



**Figura 1.12.** Central solar tèrmica amb concentradors Fresnel. (Font: “Renewables 2016 Global Status Report” del REN21 (2)).

Al ser un estudi teòric, aquest es podria ubicar a qualsevol lloc del planeta on hi hagi accés a un flux d'aigua i abundant recurs solar. La part bona d'aquest projecte és que en quant a requeriments de la presa s'estudiaria també la opció de retornar l'aigua evaporada en forma ja líquida de nou a l'embassament superior original; conseqüentment no caldria un riu de gran caudal i que no es sequi en part en èpoques caloroses (fet que succeeix a molts rius del planeta), sinó que caldria una única gran aportació d'aigua fins que s'omplís l'embassament per primer cop i després accés d'aigua en menor mesura. També es podria realitzar aquest estudi teòric en centrals hidràuliques ja existents en àrees que reben una alta radiació solar de països com Brasil, Bolívia, Egipte, Espanya (en cas de voler aplicar-ho a un país Europeu)...entre molts altres.

A diferència de les dues propostes anteriors, aquest projecte aniria més orientat a la comparació que al dimensionament en sí (igualment caldria dimensionar tant la part del camp solar com una central hidràulica). Els anteriors projectes són estudis molt específics; la construcció d'una central eòlica

*offshore* per alimentar la demanda estimada d'un nombre de grans ciutats concretes i la construcció d'una central volcànica que permeti tenir més informació sobre aquesta tecnologia i veure la possibilitat de dur a terme la seva instal·lació. Ambdós requereixen una recerca aprofundida del terreny i de l'adaptació dels equipaments a les característiques del lloc d'implementació de la central. En canvi, en aquest cas la importància d'aquesta interacció tècnica amb el medi de l'entorn on es vol situar la central hidro-solar és menor que la rellevància de la comparació obtinguda al ajuntar de diferents formes aquestes tecnologies. En altres paraules, l'estudi és més teòric que pràctic i no és tant important el lloc on es situa la central com de quines formes poden interaccionar les tecnologies que la componen.

Interessarà especialment comparar rendiments entre les moltes possibles combinacions, algunes són:

- ❖ Mantenir les centrals per separat per produir únicament electricitat.
- ❖ Emprar l'oli tèrmic o aigua provinent del camp solar per evaporar l'aigua i produir únicament electricitat (dintre d'aquesta opció mirar opcions com la implementació d'un cicle de Rankine, la pujada d'aigua a l'embassament superior).
- ❖ Emprar l'oli tèrmic o aigua provinent del camp solar per evaporar l'aigua i produir electricitat i energia tèrmica (calculant de nou cada opció anterior).
- ❖ Altres combinacions entre les tecnologies.

Possible objectiu del TFG sobre la central hidro-elèctrica: Comparar les diferents combinacions entre una central hidroelèctrica convencional i col·lectors solars tèrmics del tipus cilindre-parabòlics (rendiments, avantatges i inconvenients). Dimensionament i estudi de l'impacte positiu que podria tenir una central d'aquest tipus en un país amb abundant recurs solar i un clima àrid, a mode teòric.

#### **1.2.4. Tria de proposta**

Les tres opcions plantejades anteriorment són interessant i permeten desenvolupar un bon TFG sobre els diferents sistemes de captació energètica i d'instal·lació necessaris per la seva construcció o estudi. Desgraciadament, només hi ha temps per triar-ne una. Finalment, l'elecció ha estat la de desenvolupar l'estudi d'una central geotèrmica del tipus volcànic.

És, sense cap mena de dubte, un camp d'aplicació molt interessant i gràcies als coneixements adquirits de les centrals geotèrmiques es poden fer servir tecnologies similars a allà trobades pel seu estudi (sistemes de captació de calor, tecnologia de perforació...). Un cop conegudes aquestes tecnologies, caldrà trobar les que s'adaptin a la corba de temperatura específica del subsòl des de la superfície fins la cambra magmàtica del volcà en el que es situï la central volcànica. Tanmateix,

l'estudi d'aquesta s'ajusta perfectament als coneixements de termodinàmica, fluids, transferència de calor i elèctrics que s'han assolit al llarg del Grau en Enginyeria de l'Energia.

Vàrem considerar que la central hidro-solar era un projecte més bé teòric i les tecnologies àmpliament conegudes; a més, no hi havia cap mena de garantia que al complementar-les s'obtingués una central elèctrica de major rendiment, més aviat el contrari.

Per altre banda, la central eòlica *offshore* a la costa est dels EEUU té l'inconvenient de la dificultat d'accés a dades específiques que es necessitarien pel desenvolupament del projecte. A més, el seu dimensionament és molt senzill si es coneix la demanda a cobrir, el recurs eòlic i la potència que subministra cada aerogenerador; derivant cap a un projecte que per tenir cos requeriria d'un estudi més aprofundit de l'acoblament d'aquestes turbines eòliques a oceà obert, difícil i extremadament tècnic.

### 1.3. Coneixements necessaris

El disseny d'una central volcànica requereix de bastant coneixements que s'haurien hagut d'anar adquirint al llarg del Grau i d'altres que caldrà assimilar a mesura que es realitza el projecte. Els més importants són:

- Coneixement avançat de les lleis bàsiques de la termodinàmica i de la transferència de calor. Seran necessaris per poder fer un estudi complet de l'efecte que té la central volcànica sobre el terreny on es troba i la realització d'un model que permeti calcular l'energia extreta del sistema.
- Coneixements energètics i de física aplicada a l'enginyeria. Aquests són necessaris per estudiar els diferents balanços energètics que tenen lloc en els diferents punts de la central que s'emprarà a mode d'exemple.
- Coneixements econòmics bàsics. Per realitzar l'anàlisi econòmic cal tenir nocions bàsiques dels càlculs emprats per determinar la viabilitat econòmica d'una inversió.
- Coneixements elèctrics bàsics. Tot i no entrar en l'estudi exhaustiu dels components elèctrics que es troben en el projecte realitzat, es requereix coneixença prèvia sobre la generació d'energia elèctrica a partir d'altres tipus d'energia.
- Coneixements de geologia bàsics. Les condicions de contorn del sistema roca-tub de captació establertes pel propi tipus de roca són molt importants a l'hora de realitzar càlculs sobre el sistema. La pròpia implementació de les tecnologies de captació energètica es veuran condicionades per les característiques de la base rocosa, que caldrà una noció bàsica de geologia per comprendre.

- Coneixements informàtics i de programació bàsics. Per realitzar els càlculs i les simulacions necessàries per descriure les característiques bàsiques de la central i estudiar-ne la seva viabilitat, es fan servir softwares de tractament de dades (Excel) i específics per l'estudi d'un sistema de transferència de calor en un entorn definit (COMSOL Multiphysics®). Es requereixen coneixements bàsics de programació per utilitzar aquests programes correctament.

## 2. Introducció

La humanitat avança inexorablement cap un futur impulsat per energia provinent de fonts renovables i respectuoses amb el medi ambient, al menys aquesta és una alternativa plantejada a dia d'avui per mitigar els impactes tant negatius que està tenint el canvi climàtic i l'escalfament global sobre el planeta Terra (fins ara l'únic conegut per albergar vida humana o d'altres éssers vius). Els últims estudis corroborats per tots els grups de científics que estan fent estudis al respecte mostren, tots ells, que els efectes provocats pels gasos d'efecte hivernacle que deriven en la seva majoria de la producció d'energia mitjançant la crema de combustibles fòssils són efectivament negatius per l'hàbitat de l'espècie humana. Segons “*Global Status Report*” del REN21, (2), un 78,3% de l'energia total produïda al món provenia d'aquests combustibles fòssils l'any 2014 (veure la Figura 1.1).

Tenint en compte l'augment demogràfic continuat de la població humana, i el desenvolupament econòmic, social i industrial de nous països emergents, la demanda energètica global segueix una tendència a l'augment. Per aquest mateix motiu les energies alternatives són necessàries ara més que mai, vist que no es poden solucionar els errors del passat però sí que es pot aprendre d'ells, i plantejar un futur més saludable a curt i sobretot a llarg termini de la vida de nostre espècie en el planeta on s'allotja.

Moltes persones treballen a dia d'avui en el desenvolupament de noves tecnologies o la millora de tecnologies ja existents per reduir (o fins i tot eliminar) la seva petjada ecològica. L'estudi de qualsevol tipus central de nova creació basada en una font renovable suposa una aportació positiva al desenvolupament d'aquestes tecnologies que beneficien al medi ambient en front les que, en canvi, el perjudiquen. La central geotèrmica del tipus volcànic (o central volcànica) entra en la categoria de central renovable, ja que es basa en l'aprofitament d'energia emmagatzemada en forma d'altres temperatures en zones properes a cambres magmàtiques.

### 2.1. Objectius del treball

Primerament, hi ha el propi objectiu normatiu del propi Treball de Final de Grau; vist que la realització d'aquest és necessària per acabar la formació del Grau en Enginyeria de l'Energia.

Ara bé, entrant a valorar directament els objectius del treball realitzat en aquest document els principals són l'estudi tècnic i de viabilitat d'una central geotèrmica del tipus volcànic. Referent en el primer grup d'aquets dos, el primer objectiu que apareix és el desenvolupament d'un model de càlcul de l'extracció energètica del terreny mitjançant el sistema de captació de la central. Aquest model, que es realitzarà amb el software específic per la simulació i modelització de tasques d'enginyeria

COMSOL Multiphysics®, té la finalitat d'estudiar com afectaria la implantació d'una central volcànica de 49,35 MW en un entorn real, i quanta energia es podria extreure del subsòl on s'implementa aquesta tecnologia. També serà necessària la utilització d'un programari de tractament de dades, en aquest cas l'Excel.

En quant l'estudi de viabilitat, l'objectiu és calcular els paràmetres bàsics que permeten el dimensionament dels components més importants d'una central volcànica (del grup de captació, bescanviadors de calor, components del cicle de Rankine i del cicle de refrigeració...). D'aquesta forma, segons el resultat del model d'extracció energètica realitzat anteriorment, es pot conèixer l'energia final que la central és capaç de produir per un nombre de pous de captació determinat a l'entorn simulat amb COMSOL Multiphysics® i Excel.

Un altre aspecte a tenir en compte, és l'interès en conèixer de forma aproximada els costos d'enginyeria bàsics per dur a terme l'estudi desenvolupat en aquest document.

Per últim però no menys important, hi ha l'objectiu de valorar quin impacte tindria la realització d'aquest projecte al món real, en altres paraules, l'impacte ambiental d'una central volcànica. Per poder conèixer de forma més concisa aquest estudi es fan servir resultats de la simulació realitzada vist que s'ha tractar amb el propi entorn de la central, obtenint d'aquesta forma tant el beneficis com els perjudicis de la instal·lació d'aquesta.

## 2.2. Abast del treball

El desenvolupament o cos del projecte comença amb la cerca de tecnologies ja existent que puguin ser compatibles amb el tipus de central geotèrmica que es vol dur a terme. Aquesta tasca és de vital importància per trobar la informació corresponent a sistemes o components existents (de captació d'energia, de perforació de la roca...) requerits pel desenvolupament del projecte. Per tant, es relacionen conceptes d'altres documents com articles de revistes científiques, informació plantejada en conferències, estudis realitzats per empreses privades i molts altres, amb el propi estudi d'implantació d'una central volcànica.

L'abast o profunditat de la recerca d'aquest documents es limita per les pròpies necessitats de l'estudi; en altres paraules, està dintre del propi marc de la recerca de les tecnologies imprescindibles i/o més importants que es necessiten per poder començar a dissenyar un prototip de central com el plantejat en aquest document. Les tècniques o maneres de procedir en la construcció de centrals geotèrmiques ja existents faciliten bastant l'estudi d'aquest projecte, ja que hi ha molts punts en comú, així com les tècniques de perforació i estudi del terreny existent per la perforació de pous d'extracció de combustibles fòssils (coneixements molt estudiats i fàcilment accessibles).



Per altre banda, hi ha l'abast referent a l'estudi tècnic i de viabilitat de la pròpia central. Òbviament, es valoren els aspectes que més influència tenen sobre el càlcul global de la transmissió d'energia al llarg de tots els processos de transformació d'aquestes. S'integra als estudis les consideracions més rellevants, obviant aquelles que afecten menys al compliment dels objectius del propi treball (p.e: pèrdues per accessoris dels tubs, pèrdues en la captació energètica per la presència d'agent externs al sistema...). Així que es troba un dimensionament dels grups més importants de la central i dels components que els componen: Grup de captació d'energia, grup de transformació de l'energia captada a energia mecànica i grup de transformació a energia elèctrica.

La simulació amb COMSOL Multiphysics® i el tractament de les dades amb Excel permet un detall bastant acurat de l'efecte d'una central volcànica en un entorn fictici simulat amb característiques concretes, però com és lògic el nivell de detall no es correspon al que caldria per dissenyar la central de veritat (sobretot en quant als coneixements relacionats amb la geologia, camp mai tractat al llarg del Grau i del qual es troben limitacions evidents). Tanmateix, s'ha realitzat un estudi exhaustiu per tractar el model de la forma més acurada possible i haver pogut valorar el màxim nombre de paràmetres geològics que segons les condicions de contorn de les simulacions realitzades tenen influència en els resultats.

Finalment, en quant als estudis econòmics i d'impacte ambiental s'empren aproximacions que permeten tenir una idea de l'ordre de magnituds que es podrien donar a la realitat. El fet de no poder realitzar el projecte plantejat físicament, limita aquests estudis a la documentació i informació trobades d'altres fonts i als valors aproximats donats en aquestes pels paràmetres valorats al llarg d'ambdós estudis.

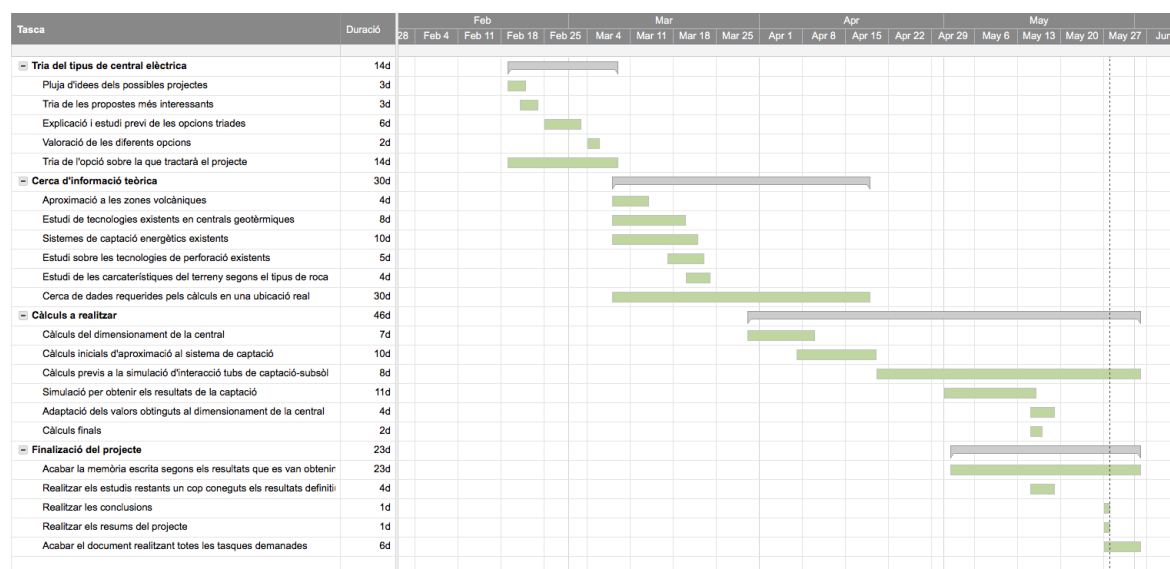
### **2.3. Planificació de les tasques per l'elaboració del treball**

Tot i que finalment la realització i els temps seguits en l'elaboració del treball han acabat sent diferents als que s'havien plantejat en un principi, és interessant veure quina era la planificació inicial del treball que tenia l'objectiu de permetre acabar el projecte perquè aquest fos entregat com a màxim el dia 1 de juny contant que es començava a treballar des del dia 19 de febrer. A continuació es veurà quines tasques s'havien plantejat abastir dintre dels temps disponibles per realitzar el projecte i quin marc de temps es pretenia que duressin. Amb l'ajuda d'un diagrama de Gantt (veure la Figura 2.1), es visualitzarà millor aquesta distribució de les diferents tasques i temps emprats en treballar-les.

Moltes de les tasques que originalment s'havien plantejat fer d'una forma han acabat canviant i fent-se d'una altra, per exemple, la cerca de dades d'un emplaçament real que es veu a la Figura 2.1 ha

sigut suplantada per la valoració de la interacció tub de captació-subsòl en la simulació amb COMSOL Multiphysics®, per poder trobar un perfil de temperatures realista del terreny amb la instal·lació dels tubs en U de captació. Ha sigut necessari fer aquesta acció vist que les fonts a qui s'ha demanat aquesta informació múltiples de dades no les tenien o bé eren confidencials (degut a que els estudis són molt cars de fer al requerir una perforació real del terreny).

D'aquesta forma, la planificació de tasques per l'elaboració del treball es pot veure a la Figura 2.1 com inicialment es va plantejar. A les columnes de l'esquerra es troben nominades les diferents activitats a realitzar i els dies que es va estimar que seria necessari dedicar-li a cadascuna. A la dreta, es pot veure la distribució cronològica d'aquestes activitats en el propi diagrama de Gantt. Aquest diagrama de la Figura 2.1 s'ha realitzat mitjançant la prova gratuïta de 30 dies de la web "app.smartsheet.com" (16).



**Figura 2.1.** Esquema central geotèrmica estàndard. (Font: app.smartsheet.com (16)).

Cap recordar, com ja s'ha dit anteriorment, que finalment l'elaboració del projecte s'ha realitzat amb diferents objectius o tasques i en diferents temps; tot i això, s'ha acabat complint amb la majoria d'afers plantejats afegint alguns de nous.

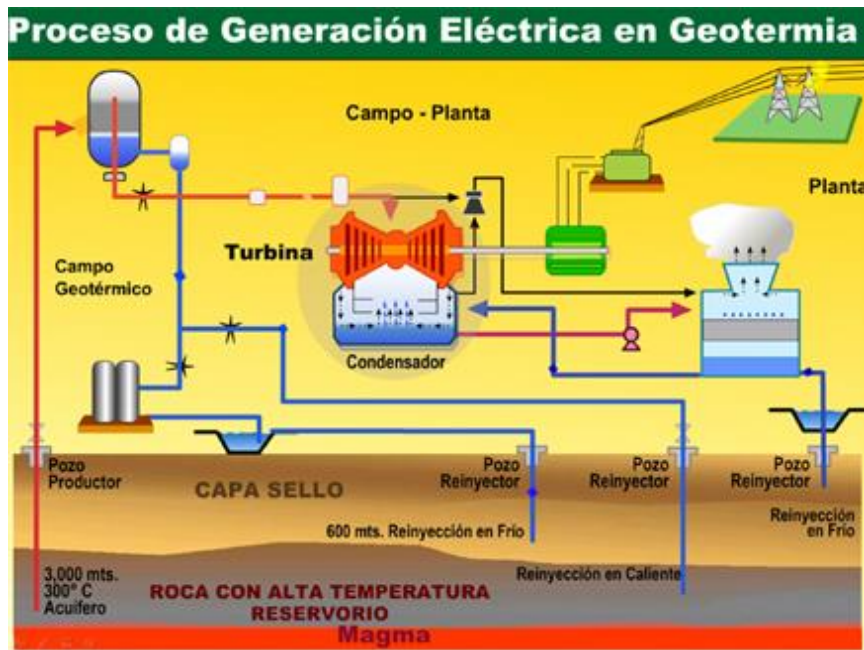
### 3. Tecnologies existents aplicables

#### 3.1. Centrals geotèrmiques

Gran part de l'estudi realitzat en aquest document del TFG prové de d'adquisició de coneixements existents a les centrals elèctriques del tipus geotèrmic. Com és lògic de pensar, la central geotèrmica del tipus volcànic i algun altre tipus de central geotèrmica (a continuació es veurà quin) realitzen un cicle de Rankine convencional com el d'una central nuclear, solar tèrmica o basada en la crema algun combustible. D'aquesta forma acoblant un generador síncron a les turbines es podrà produir electricitat.

De totes formes, en el tipus de centrals anteriorment comentades i en les que aquí s'estudien hi ha una diferència comú; la font energètica. Mentre en una central nuclear de fissió aquesta font és la descomposició d'àtoms d'urani enriquit, en una solar tèrmica és la radiació solar i en una central de carbó és el poder calorífic que d'aquest s'allibera al ser cremat; les centrals geotèrmiques (de les quals la volcànica no deixa de ser-ne un tipus) empen el gradient de temperatura del subsòl. La diferència entre les centrals geotèrmiques fins ara existents respecte la central volcànica es basa en la forma en que es troba la font de calor sota la superfície; la central volcànica empra la calor provinent d'una cambra magmàtica mentre que les centrals geotèrmiques convencionals aprofiten el que es coneix com camp geotèrmic.

El camp geotèrmic no és més que una extensió de terra (roca) amb un alt gradient de temperatura degut a l'existència d'un aqüífer confinat que actua a mode de dipòsit d'aigua calenta (la roca calenta i de l'aqüífer confinat componen el que es coneix com reservori geotèrmic). Aquesta aigua emmagatzemada manté les seves propietats perquè la roca del voltant resulta ser impermeable, permetent conservar la pressió i temperatura. La calor de acumulada a l'aigua del reservori geotèrmic es deu en la majoria de casos precisament a la presència d'una cambra magmàtica a la capa inferior d'on aquest es troba, com es veu a l'esquema d'un tipus de central geotèrmica dels que més endavant es comenten (veure la Figura 3.1). (17).



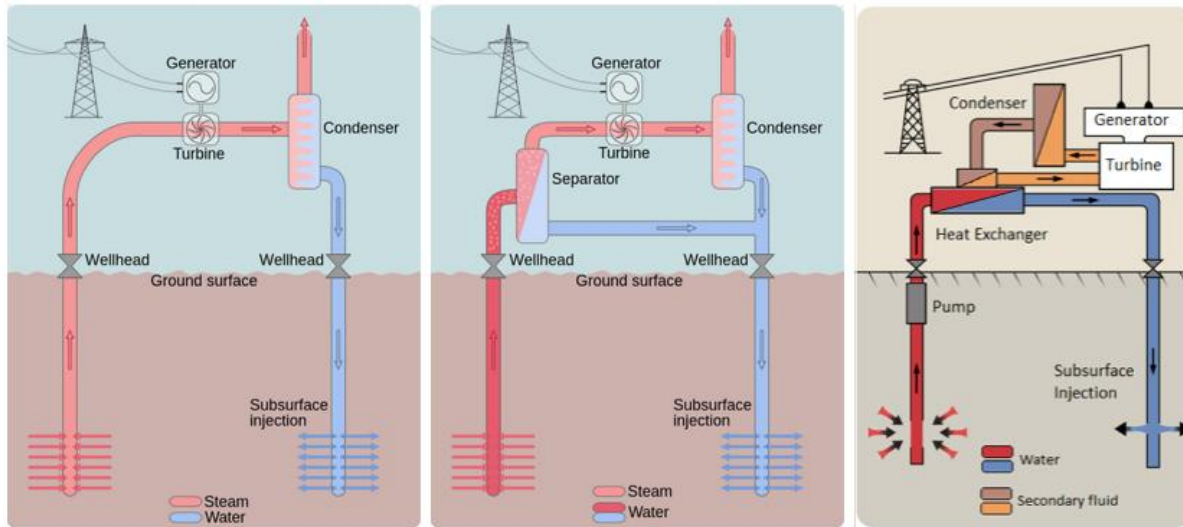
**Figura 3.1.** Esquema central geotèrmica estàndard. (Font: lageo.com.sv (17)).

Com s'aprecia a la Figura 3.1, a la part inferior es troba en vermell la presència de magma. Aquest es troba precisament a la cambra magmàtica que conté l'energia emmagatzemada que la central volcànica pretén explotar. La central geotèrmica es queda en el pas entremig, emprant la calor del reservori geotèrmic, sense anar més a baix on les temperatures són molt més altes i es pot arribar a extreure molta més energia. Les temperatures aproximades de treball d'una central geotèrmica segons la *Energy Information Administration* (EIA) són de 150 °C a 370 °C, mentre que a les cambres magmàtiques el magma pot assolir fins als 1300 °C (sol estar entre els 700 i 1300 °C); (18).

Això significa que al perforar una mica més es pot assolir un gradient de temperatura molt major, i en una ubicació on normalment ja hi ha presència d'activitat volcànica (en referència a la localització de centrals geotèrmiques) es podria aconseguir augmentar la potència de la central productora en gran mesura. Òbviament, aquesta perforació resulta molt més complicada degut a la presència d'altres temperatures en la roca i líquids molt calents (un exemple és la presència d'aquífers confinats que pot haver-hi en reservoris geotèrmics). Sinó fos així, es podria fer una perforació de 6000 km i arribar al nucli de la Terra, de forma que l'ésser humà podria tenir una font "inesgotable" d'energia: Però resulta impossible. Com s'ha dit anteriorment, una bona forma de veure la tecnologia aplicable al món real per l'estudi d'una central volcànica, és veure la tecnologia ja existent. Les centrals geotèrmiques emprades a dia d'avui es divideixen en tres grans tipus (informació extreta i contrastada a la EIA (18) i a les fonts (19) i (20).

- ❖ Plantes geotèrmiques de vapor sec: És el tipus de central geotèrmica més antic (naixent a Landerello, Itàlia, al 1904). Literalment aprofita el vapor sec a alta pressió que es troba produït de forma natural a reservoris geotèrmics; mitjançant un pou i l'extracció d'aquest cap a la superfície. Un cop extret se l'obliga a passar per turbina i seguint el cicle de Rankine el mateix vapor (que actua com a fluid tèrmic alhora que com a font energètica, fent que el reservori no sigui un generador que escalfa el fluid emprat a la turbina) es condensa i s'injecta en forma d'aigua líquida al subsòl. Necessiten el vapor en unes condicions molt concretes i poc abundants, per això a dia d'avui es troba a pocs llocs; el més destacable als guèisers del nord de Califòrnia.
  
- ❖ Plantes geotèrmiques de cicle *flash*: Aquest tipus de centrals geotèrmiques són les més comuns i emprats, degut a la manca de vapor d'alta qualitat adapta al pas per turbina i les etapes del cicle. El seu funcionament es basa en l'extracció d'aigua calenta a alta pressió (requereix una temperatura superior a 182 °C i estar en estat líquid) per ser bombejada a un tanc superior on s'introdueix. El tanc és mantingut a pressió més baixa; produint una ràpida vaporització de part de l'aigua, o com es coneix el procés en anglès "*flash*". L'aigua vaporitzada passa per turbina, mentre que la que no s'ha convertit en vapor sobreescalfat pot tornar en un segon tanc on repetir el procés o bé tornada al pou d'on s'ha extret en cas de no emprar-la per calefacció urbana. Islàndia és un exemple de país alimentat en gran mesura per aquest tipus de central renovable (degut a la presència d'una gran activitat volcànica, guèisers i aqüífers confinats entre d'altres).
  
- ❖ Plantes geotèrmiques de cicle binari: Es diferencia respecte els dos tipus anteriors en què l'aigua líquida o vapor provinent del reservori geotèrmic no entra mai en contacte amb la turbina, s'utilitza un segon cicle amb algun fluid tèrmic pel cicle de Rankine. Aquest fluid no sol ser aigua, sinó que generalment s'agafa algun amb un baix punt d'ebullició (vist que no requereixen una temperatura tan alta de l'aigua del reservori geotèrmic). D'aquesta forma l'aigua a alta pressió i temperatura o el vapor provinent del subsòl fa la funció d'escalfador en el bescanviador de calor del cicle. En el cicle de generació s'empra el fluid tèrmic al bescanviador de calor per fer girar la turbina i posteriorment es condensa per ser retornat al punt de partida i continuar amb el cicle. Com en els casos anteriors l'aigua provinent del reservori geotèrmic es retorna al subsòl o bé s'empra per altres usos com pot ser la distribució d'aigua calenta per calefacció urbana. Es pensa que en un futur seran el tipus de central geotèrmica més emprat, ja que permeten la seva instal·lació fora dels punts calents.

Les tres anteriors són segons totes les fonts consultades ((18)–(20)) els tres tipus bàsics de central geotèrmica. La Figura 3.2 mostra un esquema dels tres tipus de planta esmentats.



**Figura 3.2.** Plantes geotèrmiques de vapor sec, de cicle “flash” i de cicle binari respectivament. (Font: energyeducation.ca (20)).

### 3.1.1. Aplicabilitat a la central volcànica

Dels tipus anteriors de centrals geotèrmiques explicats i representats a la Figura 3.2, només la de cicle binari podria tenir una semblança amb el cicle que caldria realitzar per extreure calor de la cambra magmàtica de la central volcànica. Això es deu perquè els dos primers tipus de planta geotèrmica utilitzen directament l'aigua calenta extreta d'aqüífers confinats per fer-la passar per turbina (ja sigui directament vapor o utilitzant un tanc d'evaporació que utilitza els canvis de pressió). Resulta impensable emprar directament el magma, no es pot extreure d'on es troba perquè a part dels riscos que suposaria, no existeix tecnologia per extreure'n l'energia que no sigui aprofitar la seva temperatura per escalfar un segon fluid. D'aquesta forma, la central que es pretén dissenyar té més semblança amb els intercanvis que es fan a petita escala en el subsòl que a una central geotèrmica en sí, però a gran escala.

Més semblança hi ha amb la central geotèrmica de cicle binari; requerirà un cicle de Rankine tancat que només tindrà contacte amb l'energia provinent del subsòl al bescanviador de calor (subsòl entès com l'interior de la Terra). La diferència es trobarà en que l'aigua que arriba el bescanviador no serà una aigua emmagatzemada en un reservori geotèrmic, sinó que en el cas de la central volcànica caldrà tenir un cicle tancat d'aigua que vagi a buscar el gradient de temperatura que en deriva de l'existència d'una cambra magmàtica. Directament, implicarà el seu escalfament i la possibilitat de transmetre aquesta energia al fluid tèrmic del cicle de Rankine on es generarà l'electricitat.

Aquesta informació és molt important, vist que permet tenir una idea de l'aplicació que es pot donar a mètodes de captació de calor existents per les necessitats de la central volcànica. Òbviament es

tracta d'una aproximació inicial, però permet treballar amb un esbós aproximatiu de com podria ser la tecnologia de captació a desenvolupar abans d'estudiar en profunditat les característiques requerides pels components del propi sistema de captació perquè permetin suportar les condicions de treball existents. D'aquesta forma es poden trobar aplicacions comuns entre tecnologia emprada a les centrals geotèrmiques i la que es podria fer servir per instal·lar-ne una de volcànica.

### 3.1.2. Rang de potències habitual

Pot ser interessant veure quin és el rang de potències habitual de les centrals geotèrmiques. Cap recordar que segons les dades del *Global Status Report* del 2016 hi havia instal·lada una potència de 13,2 GW al 2015, que van arribar a ser 13,3 GW al principi del 2016 (2). Doncs bé, a dia d'avui hi ha projectes en desenvolupament per afegir una quantitat equivalent a 12,5 GW. Per l'any 2021 s'espera arribar als 18,3 GW (21). De totes formes cal veure quin és el rang habitual d'aquestes instal·lacions. Si s'observa la potència de diferents centrals geotèrmiques (entesa com a central productora, queden descartats intercanvis de calor amb el terra), es pot apreciar com aquest rang de potències és molt variat. Des de petites instal·lacions que no arriben ni al mega-watt fins a centrals com la del complex geotèrmic de 1808 MW *The Geysers*, a 116 kilòmetres al nord de San Francisco, que actualment és la central geotèrmica més gran del món. A Etiòpia es pretén construir pel 2021 un encara més gran, a mans de l'empresa islandesa Reykjavik Geothermal S.A., arribant a una potència superior a 3000 MW (22). Per una central volcànica que dona un pas més en la captació de calor a l'apropar-se més a la cambra magmàtica, cal a priori imaginar-se els rangs de potència més alts. La **Taula 3.1** mostra les 10 centrals geotèrmiques més grans del món a dia d'avui, la seva potència i el país on es troben.

Nom del complex geotèrmic	Potència (MW)	País on es troba
1. The Geysers	1.808	Estats Units
2. Cerro Prieto	820	Mèxic
3. Larderello (nou)	769	Itàlia
4. Olkaria	540	Kenya
5. Makban	458	Filipines
6. Salton Sea	340	Estats Units
7. Hellisheidi	303	Islàndia
8. Tiwi	289	Filipines
9. Dajarat	259	Indonèsia
10. Malitbog	233	Filipines

**Taula 3.1.**-Les 10 plantes geotèrmiques més grans del món; potència i país d'origen. (Font: elperiodicodelaenergia.com (21)).

Com es pot deduir de la **Taula 3.1**, la majoria de central geotèrmiques no superen els 200 MW, només cal veure que a EEUU hi havia al 2016 segons el REN21 una potència instal·lada de 3,567 GW i entre

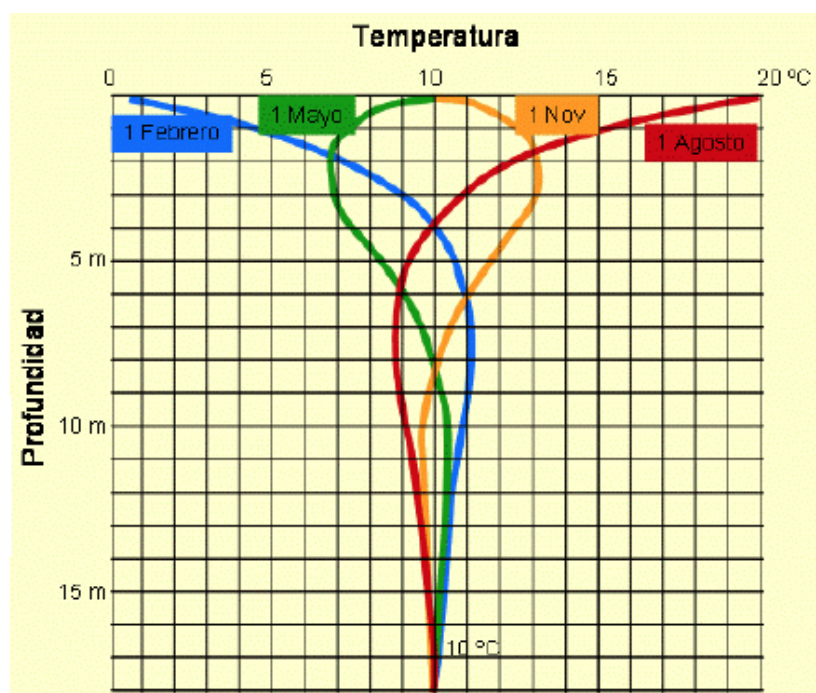
les dues centrals més grans només en cobreixen 2,148 GW. Els 1,419 GW restant eren coberts per centrals de potència menor.

### 3.1.3. Tecnologia de captació

Conèixer la tecnologia de captació és bàsic per poder dimensionar la central volcànica plantejada, ja que definirà com s'obté l'energia captada.

Tant important com conèixer el sistema de captació energètica a emprar, és saber la temperatura aproximada del fluid tèrmic i la potència generada per una central geotèrmica segons les característiques del lloc on es troba. Els enginyers Ge Ou i Itai Einav de la Universitat de Sydney, han desenvolupat un model físic que calcula de forma bastant acurada aquestes magnituds (23).

Primer de tot es busca una aproximació de la variació de la temperatura en els primers metres de la roca segons la distància vertical a la que es troba de la superfície (coneguda com gradient geotèrmic). La Figura 3.3 mostra la variació estacional de la temperatura mitja Europea.



**Figura 3.3.** Variació estacional de la temperatura del subsòl mitjana a Europa. (Font: “Guia de l’energia Geotèrmica” (24)).

D’aquesta forma s’observa a La Figura 3.3 com la roca té un coeficient de transferència de calor molt baix. El dia 1 d’Agost, la temperatura del subsòl mitja a Europa és de 20 °C a la superfície, mentre que 15 metres més a baix retorna als 10 °C que varien molt poc al llarg de l’any. A Espanya aquests valors



són més alts per totes les estacions de l'any, i segons la mateixa Guia de l'energia Geotèrmica desenvolupada l'any 2008 a la Universitat Politècnica de Madrid, aquesta temperatura mitja és a Espanya de 15 °C. Assolint els 26 °C al subsòl proper a la superfície el dia 1 d'Agost (dia que la temperatura és màxima), (24). Doncs bé, en les zones on s'ubiquen les centrals geotèrmiques aquesta temperatura sol ser major, degut a la presència del reservori geotèrmic, i segons els estudis realitzats a (25), es pot assumir que per l'estudi teòric de centrals geotèrmiques no específiques (on caldria prendre les dades de forma experimental) aquesta temperatura mitja a la superfície és de 24 °C (297 K). A més, anirà augmentant a raó de 40 K per kilòmetre de profunditat (veure Eq. 3.1).

$$T_{Sub} = 297 + 0,04H \quad (\text{Eq. 3.1})$$

On  $T_{Sub}$  és la temperatura del subsòl (en Kelvin) i  $H$  la profunditat (en metres). D'aquesta forma a 3 km i ja en el reservori geotèrmic la temperatura de la roca és de 417 K, és a dir, 144 °C. Cap destacar la presència d'aqüífers confinats permet treballar amb un rang de temperatures molt més alt per la central geotèrmica, però en aquest moment només interessa la temperatura de la roca que té un efecte directe sobre el tipus de tub que ha de ser emprat per suportar-ne aquesta.

A continuació l'estudi de Ge Ou i Itai Einav transforma les expressions teòriques procedents des de la derivada de la temperatura en funció del temps a una funció analítica que permet calcular la temperatura dependent del temps de conducció de calor en qualsevol punt del tub que es fiqui. El procés resumit a continuació és un recull de les expressions desenvolupades a (23).

S'assumeix que:

- ❖ Existeix conducció de calor entre el subsòl i el fluid de l'interior del tub, també conducció lateral en el propi subsòl.
- ❖ S'ignoren la convecció de calor al tub i la convecció vertical de subsòl, així com la radiació de calor produïdes pel tub i el propi subsòl.
- ❖ El pou de producció està aïllat (per eliminar la interferència entre aquest i el pou d'injecció que conduiria calor al terra més fred de la superfície).

L'Eq. 3.2 mostra el model físic que segueix la variació de la temperatura en funció del temps, controlada bàsicament per l'equació de conducció de calor.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \cdot \left( \frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

On:

- $k$  = Conductivitat tèrmica (W/(m·K)).

- $u$  = Temperatura (K).
- $t$  = Temps (s).
- $x, y, z$  = Eixos de l'espai (m).

Passant l'expressió anterior a coordenades polars considerant que el fluid tèrmic injectat s'escalfa amb el subsòl com si aquest fos un sistema polar simètric; s'obté l'Eq. 3.3.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \cdot \left( \frac{d^2 u}{d^2 r} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 u}{d^2 \theta} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

On:

- $r$  = Radi del tub (m)
- $\theta$  = Angle de posició específica (°).

Tenint en compte que;  $\frac{d^2 u}{d^2 \theta} = \frac{\partial u}{\partial \theta} = 0$  en situació polar, l'Eq. 3.3 es simplifica donant lloc a l'Eq. 3.4. La solució analítica d'aquesta és l'Eq. 3.5.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \cdot \left( \frac{d^2 u}{d^2 r} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$u(r, t, \theta) = C_1 \cdot J_0(\sqrt{-\lambda r}) \cdot e^{k\lambda t} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

On:

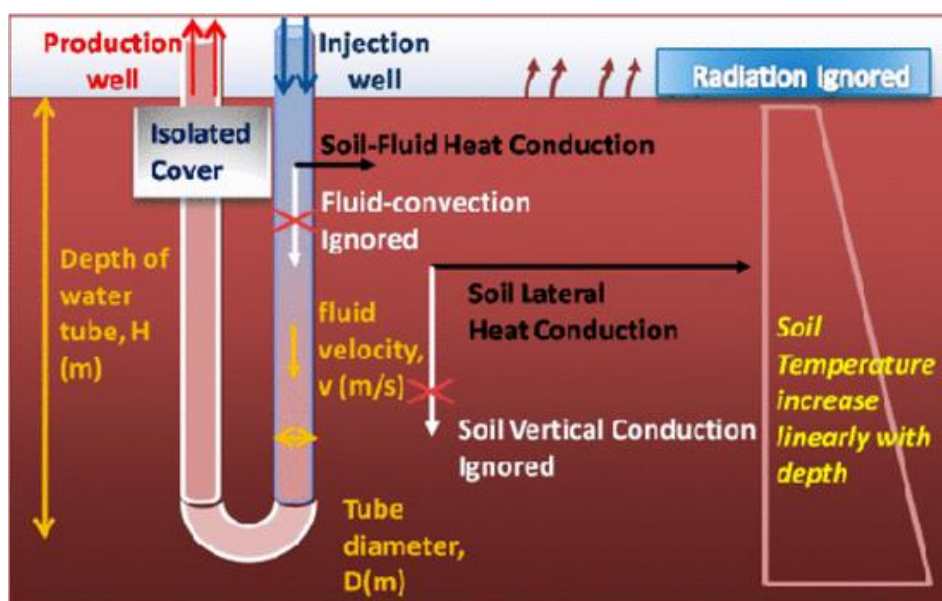
- $C_1$  = Tensor constant
- $J_0$  = Funció de Bessel (trobar segons el tub)
- $\lambda$  = Angle en la funció de Bessel(°).

És precisament aquesta última la que permet calcular la temperatura a qualsevol punt del tub si se'ns donen les condicions inicials d'una situació concreta de conducció de calor en un sistema polar d'aquest tipus. Així, i com s'explica a (23), si es coneix la temperatura a posicions radials  $j, j+1$  i  $j-1$  al temps  $n$  la temperatura al temps  $n+1$  pot ser trobada.

Més senzilles són les expressions més interessants de l'article del què s'està extraient la informació en qüestió, que són les fórmules necessàries per calcular la potència desenvolupada per la planta geotèrmica. L'article ha sigut triat principalment per un motiu; la semblança en el tipus de canonada que es vol fer servir per la central volcànica que caldrà estudiar posteriorment. Òbviament les condicions de contorn seran molt diferents, però permet fer una aproximació a les expressions amb les que caldrà familiaritzar-se. D'aquesta forma el sistema de captació més bo s'ha dit anteriorment que seria semblant al d'una central geotèrmica amb cicle binari: Pel fet que hi ha un cicle d'extracció

energètica per obtenir aigua líquida a gran pressió i temperatura (per poder-la bombejar més fàcilment i no requerir un diàmetre de canonada massa gran, amb totes les desavantatges tècniques i econòmiques que això comportaria) i un cicle de Rankine que s'alimenta precisament amb l'energia transmesa per l'aigua del primer cicle, al bescanviador de calor.

La col·locació de tub triada per una òptima transmissió de calor, al veure les centrals geotèrmiques de màxima potència, és en forma de U (en anglès *U-pipe System*). Els càlculs realitzats a continuació serveixen per aquest tipus de disposició, la qual es mostra per un millor enteniment del sistema a la Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Central geotèrmica amb sistema de captació per tub en U, i assumpcions preses. (Font: “Fluid Temperature and Power Estimation of Geothermal Power Plants by a Simplified Numerical Model” (23))

Inicialment, per calcular aquesta potència de captació de temperatura del subsòl (negligint pèrdues per fregament, accessoris del tub i dels processos de convecció i radiació esmentats anteriorment) s'aplica l'expressió bàsica que permet conèixer-ne l'energia extraïble; l'Eq. 3.6.

$$E = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 3.6})$$

On el terme  $E$  és l'energia (J),  $c$  és el calor específic de l'aigua (J/(kg·K)),  $m$  és la massa que en circula (kg) i  $\Delta T$  és l'increment de temperatura (K).

L'Eq. 3.7 mostra la massa anterior expressada en funció de la densitat del fluid  $\rho_f$  (kg/m<sup>3</sup>) i el caudal volumètric  $Q_f$  (m<sup>3</sup>/s); el producte dels quals és el caudal màssic. D'aquí es pot obtenir el resultat final

de l'Eq. 3.8 a l'incorporar les dues expressions anteriors, corresponent a la potència extraïble amb el sistema del tub en U.

$$m = \rho_f \cdot Q_f \cdot t = \rho_f \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot v \cdot t \quad (\text{Eq. 3.7})$$

$$P_H = \frac{E}{t} = c \cdot m \cdot \frac{\Delta T}{t} = c \cdot \rho_f \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot v \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 3.8})$$

On les variables no esmentades anteriorment són:

- $v$  = Velocitat del fluid (m/s).
- $D$  = Diàmetre del tub (m).
- $P_H$  = Potència de l'intercanvi de calor amb el subsòl (W).

Sempre negligint totes les pèrdues esmentades anteriorment, es pot calcular fàcilment l'energia aproximada que haurà de subministrar la bomba per proporcionar l'energia necessària a l'aigua de captació del tub en U. Aquesta potència es calcula a l'Eq. 3.9 on  $P_o$  és la potència de la bomba (W) i  $g$  és la gravetat ( $\text{m/s}^2$ ).

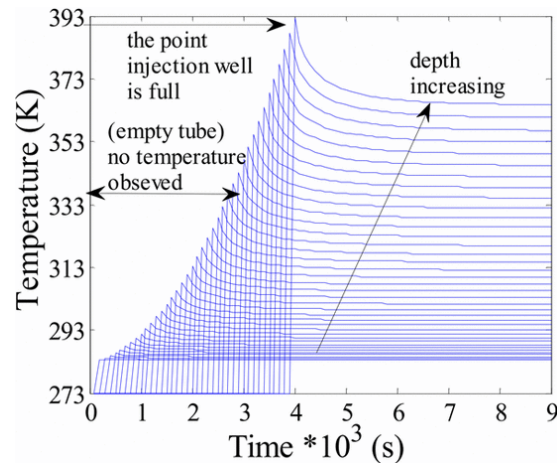
$$P_o = \rho_f \cdot g \cdot H \cdot Q_F = \rho_f \cdot g \cdot H \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot v \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Ge Ou i Itai Einav també van calcular el perfil de temperatura de l'aigua circulant pel tub en U variant l'exposició temporal a la roca calenta, amb les propietats de l'aigua de la Taula 3.2.

Propietat física	Valor
Conductivitat tèrmica del subsòl ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )	1,5
Conductivitat tèrmica de l'aigua ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )	0,6
Calor específic de l'aigua ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )	4200
Densitat de l'aigua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1000
Diàmetre del tub (m)	1
Profunditat del tub (m)	3000
Temperatura inicial de l'aigua (K)	283

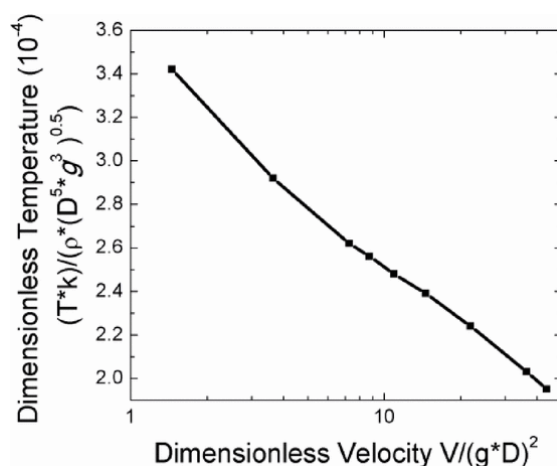
**Taula 3.2.-** Dades emprades en l'experiment i el càlcul teòric de Ge Ou i Itai Einav. (Font: "Fluid Temperature and Power Estimation of Geothermal Power Plants by a Simplified Numerical Model" [E]).

Els resultats del perfil de temperatures en funció del temps es pot veure a la Figura 3.5. Es calculen mitjançant les Eq. 3.1, Eq. 3.2, Eq. 3.3, Eq. 3.4, Eq. 3.5. Han sigut comprovats experimentalment com es veu a l'article (23).

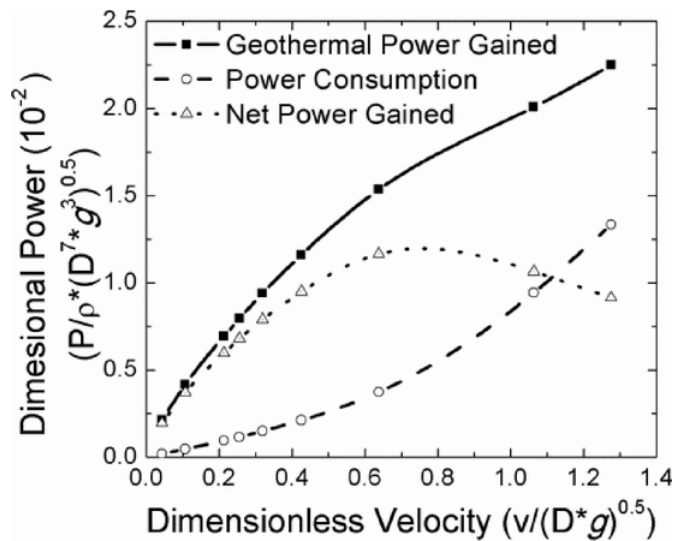


**Figura 3.5.** Perfil de temperatura en funció del temps. (Font: “Fluid Temperature and Power Estimation of Geothermal Power Plants by a Simplified Numerical Model” (23))

Per últim, G.Ou i I.Einav van fer un estudi teòric variant la velocitat de l'aigua que circula pel tub en  $U$  de 10 m/s a 300 m/s, per veure quin efecte té la seva velocitat en la temperatura. Es pren com a diàmetre del tub un de 5 m i com profunditat 6000 m, per veure'n millor l'evolució. Clarament els resultats no podrien ser possibles a un estudi real i no merament teòric, ja que l'aigua líquida no es sol fer anar a velocitats tant elevades. Les següent figures es tracten en dades adimensionals, tanmateix, permeten perfectament apreciar quins efectes té sobre la central geotèrmica la variació de la velocitat. La Figura 3.6, que compara la temperatura adimensional amb la velocitat adimensional, mostra com a l'augmentar la velocitat de l'aigua la temperatura transmesa en aquesta és menor (té sentit vist que l'exposició temporal és menor). Per altre banda, augmentar la velocitat implica un augment del caudal circulat pel tub i conseqüentment un augment de la potència de la central geotèrmica, com es veu a la Figura 3.7.



**Figura 3.6.** Gràfic temperatura-velocitat (adimensional), per l'estudi de G.Ou i I.Einav. (Font: “Fluid Temperature and Power Estimation of Geothermal Power Plants by a Simplified Numerical Model” (23))



**Figura 3.7.** Gràfic potència-velocitat(adimensionals), per l'estudi de Ge Ou i Itai Einav. (Font: "Fluid Temperature and Power Estimation of Geothermal Power Plants by a Simplified Numerical Model" (23))

Amb tota aquesta informació, s'han obtingut fórmules necessàries que s'implementaran més endavant pel dimensionament d'una central volcànica realitzada a mode d'exemple (per estudiar-ne la viabilitat) amb tecnologia de captació basada en un tub en U d'una central geotèrmica de cicle binari. Per tant es pren nota d'aquest aspecte tant important:

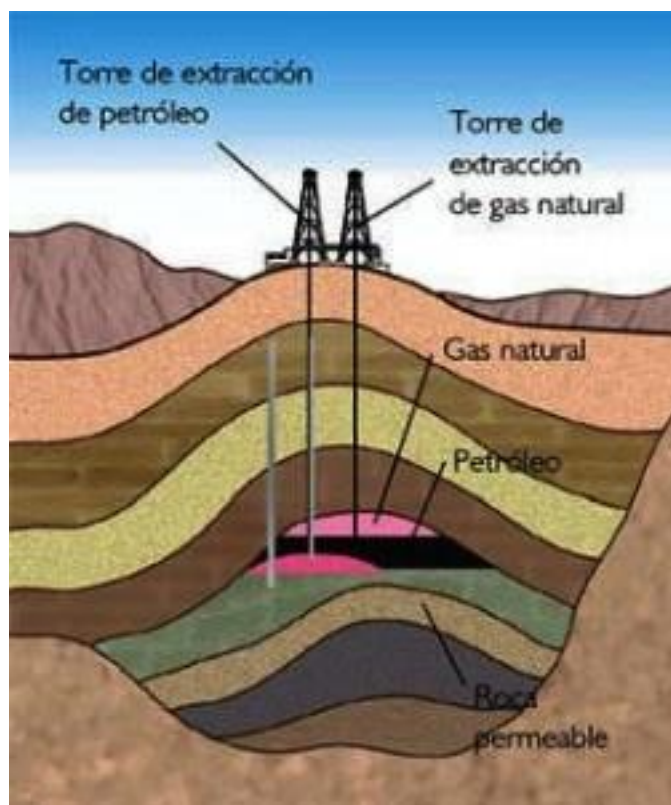
- Tecnologia de captació exportada de les centrals geotèrmiques existents: Tub en U per a la captació d'energia de l subsòl.

Ara es podrien mirar altres aspectes de les centrals geotèrmiques, sobretot en referència a quines tecnologies de perforació utilitzen. Tanmateix, vist que els aqüífers que empen es troben a molt menys profunditat que la cambra magmàtica que s'haurà de tractar per la central geotèrmica de tipus volcànic (central volcànica), es miraran altres tecnologies de perforació.

### 3.2. Tecnologia de perforació

Tant important com valorar quina tecnologia de captació energètica per alimentar la central cal fer servir, és valorar la tecnologia de perforació per introduir els tubs de captació. Per sort, aquesta tecnologia està molt desenvolupada gràcies a la gran quantitat de combustibles fòssils que l'ésser humà extreu de subsòl. El gas natural i el petroli, per exemple, s'extreuen en grans quantitats per ser processats i cremats en cotxes, central elèctriques, fàbriques i en moltes altres instal·lacions per aprofitar-ne el seu alt poder calorífic. I per dur a terme aquesta extracció són necessaris pous de gran

profunditat que arribin fins els jaciments petrolífers on es troben aquests hidrocarburs que apareixen degut a la pròpia pressió i temperatura de l'interior de la Terra aplicades a matèria orgànica del passat. El procés requereix milions d'anys per la creació de jaciments de gas natural i petroli, i poques desenes d'anys per la completa extracció del pou. La Figura 3.8 mostra l'esquema d'un jaciment petrolífer.



**Figura 3.8.** Esquema d'un jaciment de petroli a superfície terrestre. (Font: laotraopinion.net (26)).

Òbviament, no interessa per la central volcànica la tecnologia d'extracció del petroli o del gas natural, però si com s'ha fet el forat per accedir-hi. Conèixer aquest procés pot donar-nos una idea de com perforar un pou de gran profunditat.

És evident que canviarà molt la tecnologia a emprar per la perforació dels forats per on passaran els tubs de captació de calor si aquests es volen introduir amb contacte directe amb el magma o no (per les temperatures que hauran de suportar). D'aquesta forma apareixen ràpidament dues opcions a tenir en compte:

1. Els tubs passen per la roca que està en contacte amb la cambra magmàtica però no es forada fins a aquesta: Això implicaria haver de foradar la roca en forma de U i encaixar perfectament el tub en l'espai foradat. Per fer aquest forat, es pot aplicar un sistema

semblant al dels pous petrolífers o de gas natural multilaterals explicat més endavant). El rang de temperatures amb el que es treballaria seria molt més baix, permetent l'ús de tecnologies més convencionals dissenyades per temperatures més baixes. L'aspecte negatiu seria el decreixement de la potència de la central i el menor efecte sobre la reducció del perill d'erupció volcànica. Aquesta és l'opció triada per l'estudi de la central.

2. Els tubs estan en contacte directe amb la cambra magmàtica: El tub en U seguiria existint, però el procés de perforació seria molt diferent. El motiu principal és que la part del tub en forma de corba que es descriu entre les dues parts totalment verticals que connecten la superfície amb la cambra magmàtica (i que donen nom al tub en U) seria introduïda directament en el magma. L'aspecte positiu d'aquesta opció seria l'increment de la potència de la central al poder captar molta més energia degut a l'alta temperatura del magma, a més que es reduiria de forma més eficaç i ràpida el risc d'erupció volcànica al llarg d'uns milers d'anys d'aprofitar aquest intercanvi de calor (sempre i quan la pròpia presència de la central no alteri l'activitat volcànica de la zona). De totes formes, es descarta l'estudi aquesta opció; és cert que les primeres fases de la perforació podrien ser idèntiques a les del tub en U sense contacte directe amb la cambra magmàtica, però a l'estar la cambra magmàtica a alta pressió es provocaria l'aparició d'un volcà al perforar-la. En altres paraules, si es permet una sortida al magma, aquest sortiria expulsat de la cambra magmàtica provocant un possible desastre natural provocat per la perforació. A més, és difícil pensar en un material del tub que pugui suportar temperatures que poden arribar als 1300 °C.

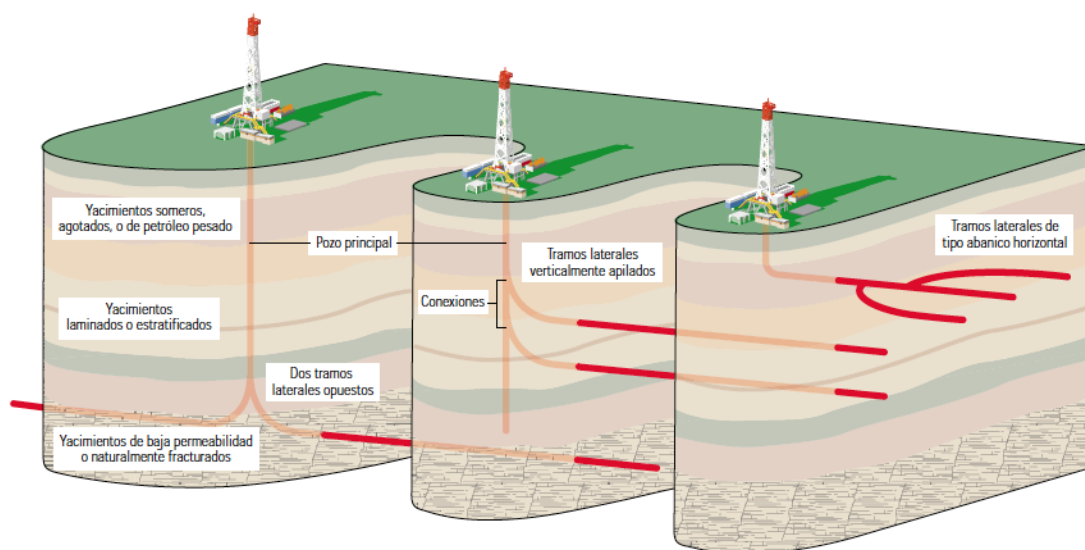
En qualsevol dels dos casos, doncs, es podria fer servir la mateixa tecnologia per excavar el forat necessari fins la part propera a la cambra magmàtica. Tanmateix es descarta l'opció 2, del pas per cambra magmàtica, pels motius prèviament exposats (risc al perforar i dificultat de trobar tecnologies compatibles). A continuació es comentarà com es pot fer aquesta perforació comparant-ho amb els sistemes que es fan servir als pous petrolífers i de gas natural; vist que són realment abundants i la tecnologia està molt desenvolupada i optimitzada.

Com s'explica a (27), al 2004 va començar un període d'automatització dels sistemes de perforació dels pous petrolífers i de gas natural. L'empresa originària de França Schlumberger Limited i M/D Totco creen un sistema que per primera vegada en la història permet una operació de perforació amb control remot (des de Cambridge, Anglaterra es va perforar a Texas, EEUU). Des d'aleshores els processos de perforació han pogut avançar considerablement.

Un dels descobriments que va suposar un canvi revolucionari en quant l'extracció de gas natural es refereix és l'extracció mitjançant pous multilaterals. La tecnologia desenvolupada a la dècada dels anys 90, com s'explica a (28), permet afegir corbes a diferents alçades del tub principal construït



verticalment per maximitzar el contacte amb el jaciment (un pou d'aquest tipus sol permetre la reducció de la superfície necessària en un 90% respecte la que seria necessària amb pous verticals, veure disposicions a la Figura 3.9). Això és interessant perquè permet una solució viable per la perforació del tub en U sense contacte directe amb la cambra magmàtica; al ser literalment un sistema que permet fer una corba en roca controlada i adaptada a les especificacions introduïdes a les màquines de perforació. En cas de tenir contacte directe amb el magma no és necessari emprar aquests segon tipus de perforadores després de fer les perforacions verticals.



**Figura 3.9.** Distribució dels pous multilaterals d'extracció de gas. (Font: Nuevos aspectos de la construcción de pozos multilaterales" (28)).

Igualment, es prefereix basar-se en la tecnologia que es fa servir en perforacions multidireccionals perquè és més nova i la informació disponible a Internet i altres fonts és més fiable i recent. En la mateixa mesura, el forat vertical que es fa en aquest tipus de pous és adaptable al que es vol fer en la central volcànica.

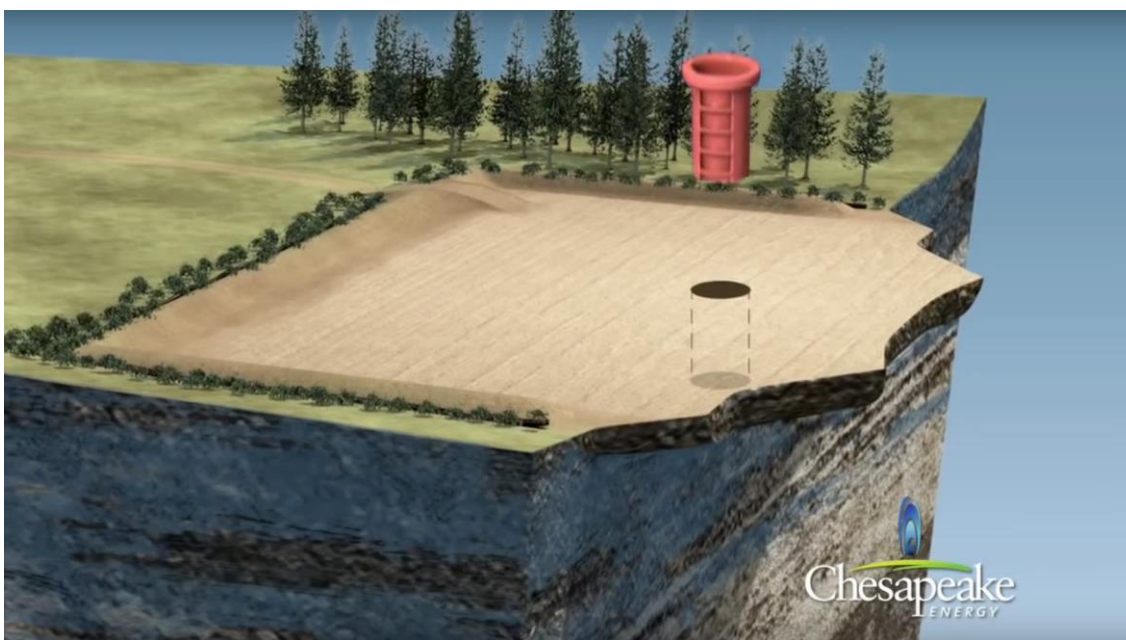
### 3.2.1. Perforació de pous multidireccionals

Per explicar les accions que cal dur a terme per la perforació d'un pou multidireccional es fa servir el resum del procés de perforació d'un pou d'extracció de gas natural: Es segueix les explicacions de l'article i del vídeo trobats a (29). Únicament interessa la part de perforació, no la de la construcció de tota la tecnologia necessària per aquesta (requereix molts processos i és un estudi totalment a part).

Un cop s'ha fet l'estudi per trobar un jaciment de petroli o gas natural adequat i s'ha construït tota la infraestructura necessària (maquinària de perforació i extracció, tancs d'emmagatzemament del gas natural, compliment de moltes normatives...) es pot començar a perforar seguint un procés molt

meticulós i portat per especialistes. A l'article (29) es troba un vídeo de l'empresa nord-americana Chesapeake Energy que explica com aquesta companyia realitza la perforació de pous multidireccionals. L'empresa esmentada sol trigar entre 21 i 28 dies en completar la perforació i posar en marxa el pou d'extracció, tenint els sistemes de perforació en marxa totes les hores de cada dia fins que acaben.

Primer de tot, es realitza un forat de gran diàmetre d'una profunditat aproximada compresa entre els 15m i els 25m. La Figura 3.10 mostra la secció de com sol ser aquest forat, i en vermell la carcassa de protecció que s'hi fica fixada (cementada) al terra. Un cop es té aquesta base, comença la perforació del forat vertical, que és el que recórrer major profunditat.



**Figura 3.10.** Forat inicial per a la perforació d'un pou de petroli o gas natural. (Font: aulafacil.com (29)).

La broca més gran que s'emprarà en el procés de perforació és, lògicament, la primera en utilitzar-se. Vist que els primers aproximadament 240 metres de perforació transcorren en una zona on abunda l'aigua en roca porosa (anomenada també *Marcellus Area*), la broca té incorporat un sistema d'expulsió d'aire comprimit que impedeix el contacte de l'aigua amb aquesta. L'aire prové d'un sistema de compressors i bombes d'aire. Així es prevé el deteriorament dels components. Aquesta mesura de seguretat es sol prendre fins ben superats els 30-60 m d'aquesta zona. La Figura 3.11 mostra una representació de la broca perforant la roca.



**Figura 3.11.** Representació de la broca del pou mentre perfora. (Font: aulafacil.com (29)).

Un cop s'ha acabat la fase d'expulsió d'aire arribant a la profunditat de seguretat esmentada (sol ser sobre el dia 7), es deixa de perforar per cimentar les parets del forat realitzat i prevenir l'entrada d'aigua al forat. Això es fa amb dispensador especial amb diàmetre poc menor que el perforat que degut a la seva forma obliga al ciment a quedar-se únicament amb contacte amb el subsòl. La Figura 3.12 mostra una representació del dispensador. Més endavant es veuran moltes proteccions que es fan perquè el subsòl no interactuï amb el gas natural i el pugui escalfar, i que es podran fer servir perquè en aquest cas no interactuin amb l'aigua de captació de la central volcànica refredant-la.



**Figura 3.12.** Representació del dispensador de ciment per aïllar el pou de l'aigua. (Font: aulafacil.com (29)).

Degut als canvis de pressió, s'instal·la un preventori d'expulsió un cop cimentat el forat fins la superfície (consisteix en un conjunt de vàlvules que segellen la pressió del pou). S'extreu el dispensador de ciment i s'introdueix una segona broca amb diàmetre menor que el de la inicial i es continua perforant per arribar al jaciment de gas. Aquesta sol perforar fins als 2440 metres (depenent d'on es trobi el jaciment). Mentre perfora, expulsa una petita quantitat de "fang de perforació", que és una barreja d'argila de bentonita i espessidors sintètics. D'aquesta forma la roca perforada queda fora del forat estabilitzat-lo, i a més evita un sobreescalfament de la broca i controla la pressió del forat. En cas que hi hagi ja ciment a les zones on s'expulsa el fang, aquest es diposita sobre el ciment fent una capa protectora. S'entén que la fase acaba quan la profunditat és l'adequada per accedir al jaciment, traient així la segona broca i donant pas a les broques més petites que perforaran no verticalment. Solen, de fet, fer corbes que permeten una perforació horitzontal (paral·lela a la superfície). Finalment es repeteix la cimentació des del final de cada broca i forat horitzontal que s'ha fet fins l'últim punt que s'havia cimentat abans. La Figura 3.13 mostra el canvi de direcció mitjançant una d'aquestes broques que permeten regular la pròpia direcció de perforació.



**Figura 3.13.** Representació d'una broca reguladora de direcció de perforació. (Font: aulafacil.com (29)).

La broca de la Figura 3.13 és la més petita i permet fer els forats que donen forma a un pou multidireccional com els que es veien anteriorment a la Figura 3.9 (precisament anomenat així per aquests canvis de direcció realitzats gràcies a aquesta última broca). Aquesta tecnologia només caldria per un sistema de captació de la central volcànica on l'aigua baixés per un tub i pugés per l'elongació d'aquest situada en paral·lel al que continua el flux de baixada, és a dir, que el forat de baixada i el de pujada es troben separats. Això es pot aconseguir o bé perforant dos forats o bé perforant un pou més gran i introduint terra entre les dues parts del tub tapant els espais lliures del

pou gran. Per exemple: Un tub en U requereix una de les dues opcions anteriors, perquè la part de tub de baixada i la de pujada no es troben en la mateixa obertura, mentre que un sistema de captació de tubs concèntrics només necessita un forat, ja que l'aigua puja i baixa pel mateix tub (part interna i posteriorment externa).

Sigui quina sigui la tecnologia de captació (tant si es fa servir la broca reguladora de direcció de perforació o no), cal cimentar de nou el forat realitzat per mantenir l'estructura de pou i garantir-ne la seva seguretat. S'extreuen les broques de perforació un cop han acabat i es repeteix el procés del dispensador de ciment comentat anteriorment i que s'ha vist a la Figura 3.12.

Per l'extracció de gas natural, interessa tenir el tub perfectament aïllat. Per aquest motiu el tub de l'empresa americana *Chesapeake Energy* que està en contacte amb la paret de terra de pou i que pel seu diàmetre més intern passa el gas, té, als primers metres de perforació, 7 capes: Ciment, carcassa de protecció, ciment, "fang de perforació", ciment, el material del tub i l'espai buit destinat a l'extracció del gas. Superats els 15 primers metres on hi ha la carcassa, les primeres dues capes desapareixen. Tanmateix l'ús que s'està donant al forat realitzat en el subsòl és totalment diferent en aquest cas que el que se li pot donar en un pou d'extracció d'un combustible fòssil. Per aquest motiu aquestes capes no es distribuïran d'aquesta forma a la central (les capes de ciment i "fang de perforació" tindran un gruix que es defineix més endavant a l'apartat on es tracta la modelització del sistema plantejat).

En cas de que es desitgi introduir a la central volcànica el sistema del tub en U d'un material conductor tant en la baixada com en pujada d'aquest, caldrà tenir en compte que en la corba subterrània no podria passar un tub prefabricat (perquè cal encaixar-lo perfectament amb el forat disponible per no deixar espais buits d'aire ja que aquest és un gran aïllant tèrmic). La idea en cas de tenir els tub ja construïts, seria la d'emprar les perforadores horitzontal per fer el forat i cimentar-lo correctament amb el ciment i el "fang de perforació", sense necessitat de ficar tub format pel material conductor en aquell petit tram.



## 4. Canvis segons el tipus de roca

La central volcànica es veurà directament afectada pel tipus de roca mare que existeixi sota la primera capa de terra (en cas de que la pròpia base rocosa no estigui en contacte directe amb l'atmosfera). És fàcil deduir que segons si la central extreu calor d'un tipus de roca o una altre la conductivitat tèrmica del subsòl variarà; provocant que el dimensionament del sistema de captació per a l'extracció d'energia tèrmica provinent de la cambra magmàtica sigui també diferent.

Per altre banda, perforar en un tipus roca sedimentària com per exemple l'argila o perforar en una roca ígnia com el basalt canvia molt; pel simple fet que la tenacitat, duresa i altres característiques de la roca varien totalment.

Cap recordar quins són els tipus de roca existents, vist que dividint l'estudi en gran blocs i triant-te el que més es pot adequar en presència d'una central com la plantejada, es pot aconseguir una aproximació a les característiques reals d'un exemple de central. S'entén per roca com “el conjunt de minerals i fragments d'altres roques que es relacionen entre sí en el temps, en l'espai i en el seu gènesi, i que formen part de la litosfera” segons (30). Tanmateix, es classifiquen en tres grans grups segons com van ser formades:

1. **Roques ígnies o magmàtiques:** La formació d'aquestes roques es deu al refredament i posterior cristal·lització de magma. Segons la velocitat de refredament del propi magma varia la mida dels cristalls entrelaçant de la pròpia roca. Els principals blocs de roques magmàtiques són: les roques plutòniques, les roques volcàniques i les roques filonianes. Les roques plutòniques o intrusives es caracteritzen per una consolidació a una zona profunda de la litosfera amb un refredament lent ( a alta temperatura). Les roques volcàniques o extrusives, són el fenomen oposat a les intrusives, vist que apareixen degut a un refredament ràpid del magma cristal·litzant a la superfície (llavors el magma passa a ser lava). Finalment, si la formació té lloc per un pas del magma per una esquerda de l'escorça terrestre com un filó, un dic o un lacòlit, entre d'altres, i es torna sòlid a l'interior d'aquesta formació, es tracta d'una roca magmàtica filoniana. (30) i (31).
2. **Roques metamòrfiques:** Són roques que han patit transformacions en estat sòlid, entès com a procés de metamorfisme. Els minerals o restes de roques que es troben en aquestes roques solen ser en sí mateixos restes d'altres roques (ja siguin magmàtiques, metamòrfiques o sedimentàries) que s'han unit per canvis de temperatura, pressió o presència de fluids químicament actius i reaccions entre diferents minerals que les componen. Un cop estan formades, són molt resistents a l'erosió i el desgast. (30) i (31).

3. **Roques sedimentàries:** La formació de les roques sedimentàries s'atribueix a la unió formada entre sediments, normalment gràcies a l'acumulació en capes en el fons de grans masses d'aigua. El lloc on es dipositen els sediments s'anomena conca sedimentària. Així, les capes de sediments superiors aixafa les inferiors compactant-les, i si el sediment compacte du a terme el procés de cimentació s'obté aquest tipus de roca. Poden intervenir factors com l'activitat geològica o la precipitació química.

Tenint en compte que la central volcànica es trobarà, necessàriament, en una zona amb vulcanisme actiu proper a la superfície (ja que en cas contrari les cambres magmàtiques no subministrarien energia suficient per la generació d'electricitat), el tipus de roca més probable amb el que s'haurà de tractar és la roca magmàtica (granits, andesites, basalts, traquites...).

La capa més superficial de l'escorça terrestre sol estar formada per varis materials alterats o disgregats que no són els mateixos que la roca que hi ha uns metres més a baix. Aquesta capa pot no existir i tenir directament roca en la capa més superficial, i en cas d'existir la seva extensió varia fàcilment d'una ubicació a una altra. Doncs bé, en edafologia - entesa com "la branca de la ciència que estudia la composició i naturalesa del sòl en la seva relació amb les plantes i l'entorn que el rodeja" segons (32) - la roca mare, base rocosa o substrat rocós (fins i tot horitzó D) és entesa com aquella roca situada sota aquesta primera capa exterior. Òbviament, per facilitar els càlculs, es suposarà que la central s'ubica en un lloc amb un únic tipus de roca sense combinacions d'aquestes que podrien introduir molts paràmetres a tenir en compte. (33).

A continuació s'estudia com afectarà el tipus de roca (mare) existent a la ubicació de la central, amb especial èmfasis a la determinació de la conductivitat tèrmica del subsòl que afectarà a tots els altres estudis energètics de la central.

#### **4.1. Canvis en la conductivitat tèrmica del terreny**

La conductivitat tèrmica del terreny emprada en la modelització del procés de captació energètica del subsòl a partir del tub en U emprat per extreure la pròpia energia en forma de calor, és un paràmetre molt important a tenir en compte. Ubicar la central volcànica en una localització caracteritzada per tenir una roca a alta temperatura a poca profunditat, amb una alta conductivitat tèrmica del subsòl i de fàcil perforació difereix molt d'una ubicació de difícil accés amb roca de baixa conductivitat tèrmica i localització del calor a gran profunditat.

En quant a la conductivitat tèrmica ( $k$ ) es refereix; quant major sigui aquesta menor serà la distància a la que es podran ubicar els pous de captació situats un darrere l'altre, vist que el ritme de restitució

de la temperatura extrema serà molt més baix en una roca amb conductivitat baixa que en una amb d'alta, resultant amb un radi d'afectació sobre el terreny per extreure la mateixa energia molt més gran. S'ha de deixar que la pròpia convecció del magma calent que ve a suplir l'energia extrema de la cambra magmàtica impedeixi refredament de la roca en contacte en el tub (pel propi moviment cíclic del magma de la cambra magmàtica que es refreda i baixa a l'augmentar la seva densitat mentre el seu espai l'ocupa magma calent provinent de capes inferiors). En altres paraules, una conductivitat més alta de la roca permet que els pous en paral·lel es puguin ficar un més a prop de l'altre per la pròpia interacció de l'extracció de calor duta a terme pels tubs de captació amb la roca, que restitueix l'energia perduda amb una transferència de calor per conducció amb la cambra. A l'apartat de la modelització del procés de captació realitzat amb COMSOL Multiphysics® s'explica més detalladament com afecta l'extracció al terreny i es calcula a quina distància mínima cal situar els pous entre ells.

Abans de determinar el tipus de roca sobre el que es situarà la central volcànica que s'està estudiant a mode d'exemple, i repetint el que ja s'ha dit en apartats anteriors, aquest projecte té com a objectiu descriure de la forma més real possible el funcionament teòric d'una central com la plantejada; per tant cal veure com varia la conductivitat tèrmica de la pròpia roca segons les condicions del seu contorn. Hi ha pocs factors que alterin la conductivitat tèrmica d'una mateixa roca, malgrat això, és interessant veure quins són per poder determinar amb més exactitud quina  $k$  s'espera per la base rocosa de la central volcànica.

A mesura que es va baixant en profunditat en el subsòl, la roca que compona en aquest es va trobant progressivament a més pressió i temperatura (entre d'altres canvis dels que se'n negligeix l'efecte sobre la conductivitat tèrmica). Així que a continuació s'analitza com varia de forma teòrica aquesta conductivitat de la roca on es troba el tub de captació en funció de A) la pressió i B) la temperatura.

#### 4.1.1. Variació de $k$ en funció de la pressió de la roca

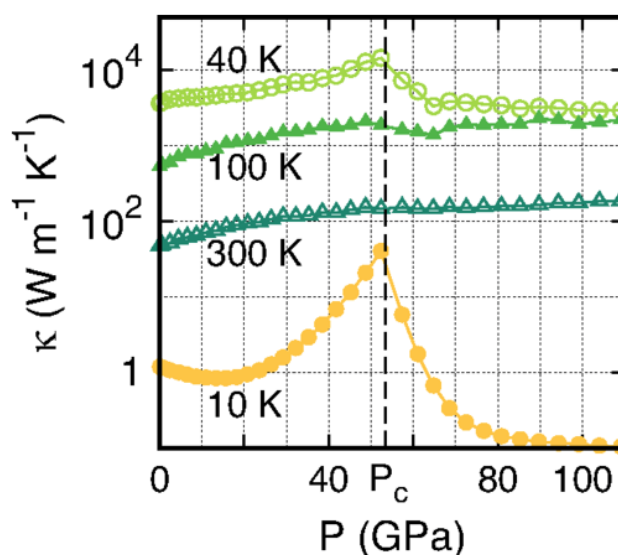
Normalment es dona la conductivitat tèrmica d'un material (ja sigui en estat sòlid, líquid o gasós) en funció de la temperatura a la que es troba. Tanmateix, a una mateixa temperatura, també varia aquesta magnitud que especifica la facilitat de conducció tèrmica del material estudiat en funció de la pressió. El problema és que no hi ha una fórmula definida que relacioni directament la pressió de tots els materials amb la seva conductivitat tèrmica. Si es coneixen tots els paràmetres i característiques del material en qüestió excepte la conductivitat tèrmica es pot determinar relacionant la difusivitat tèrmica ( $\alpha$ ) en  $\text{m}^2/\text{s}$ , la densitat del material ( $\rho$ ) en  $\text{kg}/\text{m}^3$  i el calor específic ( $C_p$ ) en  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  com es veu a l'Eq. 4.1.

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (\text{Eq. 4.1})$$



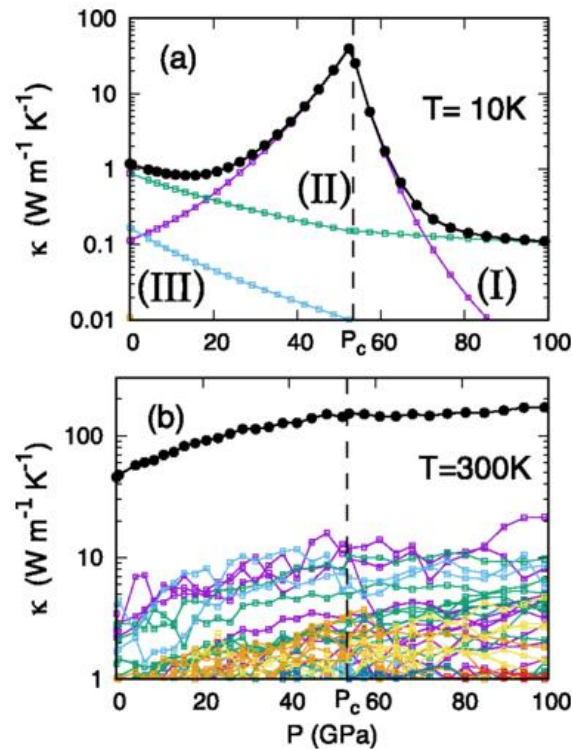
Cap d'aquestes propietats està aparentment relacionada amb la pressió del material, però si que estan relacionades amb la temperatura. Al cercar estudis que relacionen la pressió d'un material amb la seva conductivitat tèrmica es troba en molts casos estudis duts a terme mitjançant experiments per materials concrets, això es deu a que l'efecte de la pressió sobre  $k$  és determinat per circumstàncies concretes per materials concrets, i no segueix una relació definida igual per tots els materials. Hi ha multitud d'articles que tracten aquesta dependència, i un que es considera interessant per justificar les afirmacions anteriors és el següent: *"Thermal conductivity changes across a structural phase transition: The case of high-pressure silica"* (34).

L'objectiu d'aquest estudi era investigar les propietats tèrmiques ( $k$  i  $\alpha$ ) del silici a mesura que evolucionava sota una compressió hidrostàtica per a diferents temperatures. D'aquesta forma, variant la pressió aplicada al material per 10K, 40 K, 100K i 300 K els enginyers que van dur a terme aquest estudi demostren que el aquests paràmetres del silici es veuen molt més afectats per la variació de pressió quan aquest es troba a baixa temperatura que a temperatures més elevades. Sense entrar en detall en els càlculs que van realitzar – basats en "calcular el tensor de conductivitat tèrmica resolent l'equació linealitzada de transport de Boltzmann iterativament en un ampli rang de temperatures, utilitzant els acoblaments interatòmics harmònics i aniónics dependents de pressió obtinguts a partir dels primers principis" segons (34) – el resultats obtinguts van ser els que es veuen a la Figura 4.1.



**Figura 4.1.** Relació de la conductivitat tèrmica del silici amb la pressió per 10K, 40K, 100 K i 300 K. (Font: *"Thermal conductivity changes across a structural phase transition: The case of high-pressure silica"* (34)).

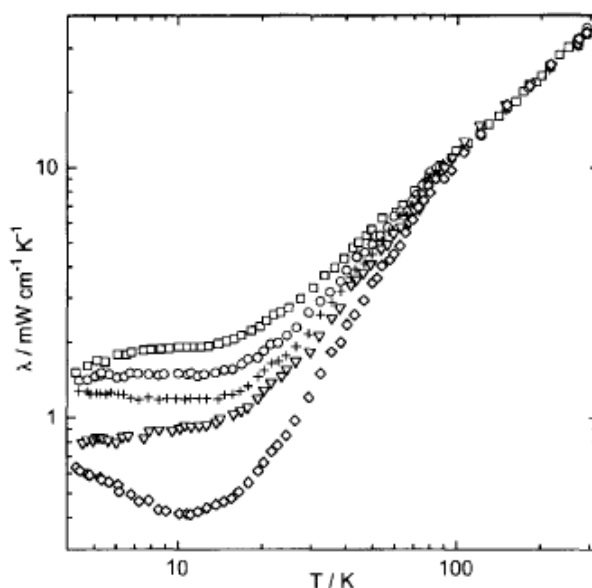
Es demostra, doncs, que quant major és la temperatura en un material menor es la influència que té sobre la conductivitat tèrmica la variació de la pressió. També es veu clarament a la Figura 4.1 que la influència d'aquesta conductivitat amb la temperatura és evident. De fet la Figura 4.2 mostra encara més clarament com a 300 K la relació de la conductivitat tèrmica amb la variació de pressió és menyspreable i a 10 K és totalment dependent.



**Figura 4.2.** Representació de la conductivitat tèrmica en funció de la pressió a 10 K i a 300 K (Font: “Thermal conductivity changes across a structural phase transition: The case of high-pressure silica” (34)).

Seguint l'exemple del silici, ja que s'està parlant sobre aquest, un altre estudi ha demostrat fins a quina temperatura l'efecte de la pressió no és menyspreable pel silici vidriós. Sense entrar a valorar els càlculs i experimentació que han dut a terme els enginyers que han realitzat aquest estudi, han demostrat que “hi ha una molt forta influència de la pressió sobre la conductivitat tèrmica”, però pel silici “Suprasil W2 és força pronunciada a la zona altiplà i no és detectable a temperatures superiors a 80 K” segons (35).

La Figura 4.3 mostra els resultats que es van obtenir en l'estudi esmentat sobre el silici “Suprasil W2” per diferents pressions: ( $\square$ )  $p = 0,1$  MPa; (O)  $p = 300$  MPa; (+)  $p = 570$  MPa; ( $\Delta$ )  $p = 920$  MPa; ( $\boxplus$ )  $p = 1650$  MPa.



**Figura 4.3.** Conductivitat tèrmica de "Suprasil W2" enfront de la temperatura a algunes pressions seleccionades (Font: "Low-temperature thermal conductivity of vitreous silica under high pressure," (35)).

Com es pot veure en la Figura 4.3, tots els valors de conductivitat tèrmica comencen a confluir per les diferents pressions estudiades a partir de 80 K, i a partir d'aquesta temperatura del propi silici la conductivitat tèrmica és igual independentment de a quina pressió es trobi aquest. D'aquesta forma, vist que la roca que es tractarà es trobarà a temperatures molt més altes que 80 K i per molt que no sigui silici aquest concepte serà aplicable a qualsevulla roca, es negligirà la dependència de la conductivitat tèrmica de la pressió.

Negligint l'efecte de la pressió sobre  $k$ , cal veure a continuació quin és l'efecte de la temperatura, que s'ha vist a tots els gràfics anteriors que existeix per les fonts (34)(35).

#### 4.1.2. Variació de $k$ en funció de la temperatura de la roca

Ja s'ha vist anteriorment que existeix una dependència directa entre la conductivitat tèrmica d'un material sòlid i la temperatura a la que es troba aquest material (en aquest cas interessa la roca mare existent sota la central volcànica a estudiar). Ara bé, aquesta relació tampoc és constants per tots els materials, i com en el cas d'anàlisi de l'efecte de la pressió, es requereixen les dades reals de variació de conductivitat tèrmica en funció de la temperatura de la roca perforada per implementar el sistema de captació de la central.

No és difícil trobar taules amb els rangs de conductivitats tèrmiques de diferents roques, la Figura 4.4 mostra una comparació de les conductivitats tèrmiques per diferents tipus de roques segons onze mètodes de càlcul desenvolupats per diferents científics al llarg dels anys que apareixen especificats a

peu d'imatge. És interessant veure com fins i tot a dia d'avui hi ha tanta varietat de resultats per una mateixa mesura, vist que les equacions existents (que n'hi ha moltes, però totes desenvolupades a partir de dades experimentals per roques concretes) s'apliquen sota condicions molt específiques i van canviant a mesura que un nou estudi deixa obsolet un d'anterior.

Lithology	Sources										
	1 <sup>a</sup>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sandstone	7.1	4.2 ± 1.4	3.1 ± 1.3		3.7 ± 1.2	2.8		3.7 ± 1.2			4.7 ± 2.8
Claystone	2.9				2.0						1.8
Mudstone	2.9							2.0 ± 0.4			1.9 ± 0.4
Shale	2.9	1.5 ± 0.5	1.4 ± 0.4		2.1 ± 0.4	1.4		2.1 ± 0.4			1.8 ± 1.2
Kaolinite									1.8 ± 0.3		
Glauconite									0.5 ± 0.2		
Siltstone	2.9	2.7 ± 0.9	3.2 ± 1.3		2.7 ± 0.2	2.7 ± 0.9		2.7 ± 0.2			
Limestone	3.1	2.9 ± 0.9	2.4 ± 0.9	2.21	2.8 ± 0.4		3.4 ± 3.0	2.8 ± 0.3			2.5 ± 0.6
Marl	3.2	2.1 ± 0.7	3.0 ± 1.1		2.7 ± 0.5						2.4 ± 0.5
Dolomite		5.0 ± 0.6	3.1 ± 1.4		4.7 ± 0.8		4.8 ± 1.5	4.7 ± 1.1			3.7 ± 1.8
Halite		5.5 ± 1.8	5.7 ± 1.0		5.4 ± 1.0			5.4 ± 0.3			5.9
Chert		4.2 ± 1.5	1.4 ± 0.5		1.4 ± 0.5						
Quartzite				6.0			5.0 ± 2.4	5.9 ± 0.8		3.5 ± 0.4	5.6 ± 1.9
Granite							3.4 ± 1.2			3.5 ± 0.4	2.8 ± 0.6
Basalt	1.8			1.7			1.7 ± 0.6			2.0 ± 0.2	1.5
Tuff				1.7 ± 0.3							
Conglomerate		2.4 ± 0.8	3.2 ± 1.8		2.1 ± 1.0						
Coal		0.3 ± 0.1	0.2 ± 0.2	0.2 ± 0.04	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1					
Loose sand				2.44 ± 0.8							
Typical sediment			2.3 ± 2.0								

<sup>a</sup>Matrix conductivity values, only representing bulk conductivity when  $\phi = 0$ .  
 Sources: 1 = Beardmore (1996), 2 = Majorowicz and Jessop (1981), 3 = Beach, Jones and Majorowicz (1987), 4 = Raznjevic (1976), 5 = Reiter and Jessop (1985), 6 = Taylor, Judge and Allen (1986), 7 = Roy et al. (1981), 8 = Reiter and Tovar (1982), 9 = Touloukian et al. (1970b), 10 = Drury (1986), 11 = Barker (1996).

**Figura 4.4.** Conductivitat tèrmica a temperatura ambient de diferents roques per 11 mètodes experimentals diferents (Font: "A guide to Measurement and Modeling" (36)).

El motiu pel qual s'ha ensenyat la taula anterior i no directament una que mostri directament els valors de conductivitat tèrmica en funció de la temperatura, és precisament per destacar que aquesta variació de conductivitats ve definida precisament per la temperatura a la que es trobi la roca en qüestió. Mitjançant una gran quantitat d'experiments, s'ha pogut acabar escrivint una taula com la que s'observa a la Figura 4.5, on es mostra la conductivitat tèrmica ( $\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) per totes les roques i diferents temperatures. Vist que la Figura 4.5 és massa petita per poder veure els valors de conductivitats tèrmiques per diferents temperatures, es crea la Figura 4.6 amb l'únic objectiu de mostrar com estan recollits aquests valors en les taules de conductivitat de les roques. Tanmateix, quan més endavant s'agafin valors de conductivitats tèrmiques per roques magmàtiques en l'apartat de modelització del sistema de captació; es farà referència a la Figura 4.5 (tampoc es considera necessari adjuntar totes les taules, simplement es consulta del llibre "Thermal Conductivity and Specific Heat of Minerals and Rocks" en versió PDF (37)).

Table 8. Temperature effect on the thermal conductivity, $k$ , of rocks.																				
Rock	Ref.	$\rho$ 10 <sup>3</sup> kg m <sup>-3</sup>	$k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$T$ [°C]																
				0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
<b>Igneous rocks</b>																				
Alkali Granite	Sak73	2.81	2.80	2.80	2.80	2.60	2.38	2.22	2.04											
				Granite	Sak73	2.62	3.52	3.50	3.24	2.74	2.30	2.31	2.20							
				Bir40	2.61	3.52	3.27	3.02	2.70	2.45										
				Bir40	2.61	3.80	3.48	3.22	2.85											
				Bir40	2.65	2.79	2.81	2.47	2.30											
Granite	Bir40	2.64	2.34	2.27	2.14															
				Moi68	2.00	1.70	1.37	1.19	1.08	0.99	0.92	0.89	0.84	0.84	0.88	0.89	0.97	1.05		
				Moi66	1.23	1.05	0.90	0.84	0.82	0.89	0.98	0.98								
				Hyn71	2.17	1.93	1.54	1.25	1.23	1.14	1.08	1.02	0.99	0.98	0.98	1.00	1.07	1.16		
				Quartz Diorite	Sak73	2.72	2.52	2.68	2.40	2.38	2.20	2.09	2.02							
Quartz Diorite	Kaw64	2.64	3.56	3.37	3.24	3.06	2.93	2.85	2.83	2.81										
				Syenite	Bir40	2.80		2.20	2.13	2.09										
				Monzonite	Bir40	2.64	3.17	2.92	2.74	2.47										
				Tonalite	Bir40	2.74	2.89	2.58	2.47	2.31										
				Diorite	Kaw64	2.92	2.07	2.01	1.97	1.84	1.76	1.67	1.59	1.57	1.55					
Gabbro	Hyn71	1.98	1.87	1.60	1.48	1.39	1.30	1.21	1.10	1.06	1.01	1.01	1.05	1.15						
				Bir40	3.03	3.32	3.25	3.20	3.15											
				Bir40	2.86		1.93	1.95	1.99											
				Bir40	2.88	1.99	1.99	1.99	1.99	2.00	2.01									
				(continued)																

Table 9 (continued)																			
Rock	Ref.	$\rho$ 10 <sup>3</sup> kg m <sup>-3</sup>	$k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$T$ [°C]															
				0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
<b>Gabbro (Pyroxene)</b>																			
Hornblende Gabbro	Moi66	3.06	3.24	3.16	3.08	2.91	2.76	2.68	2.58	2.47	2.43								
				Bir40	2.71	1.85	1.88	1.90	1.96										
				Bir40	2.70	1.73	1.75	1.78	1.82	1.88									
				Bir40	2.74	1.68	1.69	1.71	1.79										
				Peridotite	Kaw64	3.05	3.80	3.35	2.99	2.76	2.60	2.43	2.30						
Hypersthene	Kaw64	2.95	4.10	3.85	3.64	3.29	3.04	2.81	2.68	2.51									
				Bir40	3.26	4.01	4.19	3.90	3.64										
				Brecciated	Bir40	3.26	4.65	3.85	3.56	3.28	3.06								
				Dunite	Wu52	5.19	4.40	3.94	3.39										
				Kaw64	3.21	4.19	3.77	3.48	3.05	2.70	2.43	2.22	2.05	1.93					
Olivine	Bir40	3.27	4.84	4.19	3.69	3.15													
				Bir40	3.25	5.99	4.77	4.23	3.67										
				Bir40	3.25	4.69	4.23	3.69	3.38										
				Kaw66	3.73	4.06	3.54	3.52	3.55	3.58	3.60	3.66	3.50	3.50	3.47	3.27	2.95		
				Hori68	3.16	2.80	2.98	1.87	1.89	1.83	1.74	1.66	1.60	1.58	1.57	1.55	1.51	1.49	1.47
Ultrabasic	Hyn71	3.25	3.59	2.96	2.46	2.30	2.18	2.09	2.02	1.95	1.88	1.84	1.81	1.78	1.77	1.76			
				Kaw66	3.56	3.18	3.79	3.22	3.10	3.03	2.83	2.74	2.69	2.64					
				(continued)															

Table 10 (continued)																				
Rock	Ref.	$\rho$ 10 <sup>3</sup> kg m <sup>-3</sup>	$k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$T$ [°C]																
				0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
<b>Metamorphic rocks</b>																				
Mylonite	Bir40	2.60	3.08	2.70	2.49	2.31	2.16	2.02	1.88	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94		
				Bir40	2.69	3.05	2.85	2.63	2.31	2.01	1.76	1.54	1.34	1.14	0.94	0.74	0.54	0.34	0.14	
				Quartzite	Wu52	3.05	2.45	2.26	2.04	1.82	1.60	1.38	1.16	0.94	0.72	0.50	0.28	0.06	0.02	
				Supersaturated	Kaw64	2.74	4.41	4.39	3.87	3.37	3.08	2.76	2.58	2.41	2.26					
				Peridotite	Hyn71	1.98	1.87	1.60	1.48	1.39	1.30	1.21	1.10	1.06	1.01	1.01	1.05	1.15		
Eclogite	Kaw64	3.50	2.51	2.41	2.30	2.31	2.19	1.94	1.64	1.36	1.14	0.94	0.74	0.54	0.34	0.14	0.04			
				Moi66	1.10	1.40	1.60	1.80	1.55	1.37	1.23	1.21	1.25	1.37	1.47	1.57	1.67	1.77	1.87	
				Moi66	1.62	1.53	1.34	1.28	1.20	1.10	0.97	0.89	0.80	0.82						
				(continued)																

Table 11 (continued)																				
Rock	Ref.	$\rho$ 10 <sup>3</sup> kg m <sup>-3</sup>	$k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$T$ [°C]																
				0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
<b>Metamorphic rocks</b>																				
Gneiss	Bir40	2.64	3.08	2.70	2.49	2.31	2.16	2.02	1.88	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94		
				Bir40	2.64	2.86	2.69	2.50	2.02											
				Albite	Bir40	2.61	2.03	2.03	2.01	1.97	1.91									
				None	(not oriented)	Wu52	2.05	2.08	1.88	1.63	1.47									
				(not oriented)	Kaw64	2.70	2.66	2.53	2.45	2.30	2.18	2.07	2.01	2.01						
Diorite	Bir40	2.76	1.94	1.84	1.77	1.71														
				(continued)																

Table 12 (continued)																				
Rock	Ref.	$\rho$ 10 <sup>3</sup> kg m <sup>-3</sup>	$k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$T$ [°C]																
				0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
<b>Metamorphic rocks</b>																				
Gneiss	Bir40	2.64	3.08	2.70	2.49	2.31	2.16	2.02	1.88	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94		
				Bir40	2.64	2.86	2.69	2.50	2.02											
				Albite	Bir40	2.61	2.03	2.03	2.01	1.97	1.91									
				None	(not oriented)	Wu52	2.05	2.08	1.88	1.63	1.47									
				(not oriented)	Kaw64	2.70	2.66	2.53	2.45	2.30	2.18	2.07	2.01	2.01						
Diorite	Bir40	2.76	1.94	1.84	1.77	1.71														
				(continued)																

Table 13 (continued)																				
Rock	Ref.	$\rho$ 10 <sup>3</sup> kg m <sup>-3</sup>	$k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$T$ [°C]																
				0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
<b>Metamorphic rocks</b>																				
Gneiss	Bir40	2.64	3.08	2.70	2.49	2.31	2.16	2.02	1.88	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94		
				Bir40	2.64	2.86	2.69	2.50	2.02											
				Albite	Bir40	2.61	2.03	2.03	2.01	1.97	1.91									
				None	(not oriented)	Wu52	2.05	2.08	1.88	1.63	1.47									
				(not oriented)	Kaw64	2.70	2.66	2.53	2.45	2.30	2.18	2.07	2.01	2.01						
Diorite	Bir40	2.76	1.94	1.84	1.77	1.71														
				(continued)																

Table 14 (continued)																				
Rock	Ref.	$\rho$ 10 <sup>3</sup> kg m <sup>-3</sup>	$k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$T$ [°C]																
				0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
<b>Metamorphic rocks</b>																				
Gneiss	Bir40	2.64	3.08	2.70	2.49	2.31	2.16	2.02	1.88	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94		
				Bir40	2.64	2.86	2.69	2.50	2.02											
				Albite	Bir40	2.61	2.03	2.03	2.01	1.97	1.91									
				None	(not oriented)	Wu52	2.05	2.08	1.88	1.63	1.47									
				(not oriented)	Kaw64	2.70	2.66	2.53	2.45	2.30	2.18	2.07	2.01	2.01						
Diorite	Bir40	2.76	1.94	1.84	1.77	1.71														
				(continued)																

Table 15 (continued)																				
Rock	Ref.	$\rho$ 10 <sup>3</sup> kg m <sup>-3</sup>	$k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$T$ [°C]																
				0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
<b>Metamorphic rocks</b>																				
Gneiss	Bir40	2.64	3.08	2.70	2.49	2.31	2.16	2.02	1.88	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94		
				Bir40	2.64	2.86	2.69	2.50	2.02											
				Albite	Bir40	2.61	2.03	2.03	2.01	1.97	1.91									
				None	(not oriented)	Wu52	2.05	2.08	1.88	1.63	1.47									
				(not oriented)	Kaw64	2.70	2.66	2.53	2.45	2.30	2.18	2.07	2.01	2.01						
Diorite	Bir40	2.76	1.94	1.84	1.77	1.71														
				(continued)																

Table 16 (continued)																				
Rock	Ref.	$\rho$ 10 <sup>3</sup> kg m <sup>-3</sup>	$k$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$T$ [°C]																
				0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
<b>Metamorphic rocks</b>																				
Gneiss	Bir40	2.64	3.08	2.70	2.49	2.31	2.16	2.02	1.88	1.74	1.64	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94		
				Bir40	2.64	2.86	2.69	2.50	2.02											
				Albite	Bir40	2.61	2.03	2.03	2.01	1.97	1.91									
				None	(not oriented)	Wu52	2.05	2.08	1.88	1.63	1.47									
				(not oriented)	Kaw64	2.70	2.66	2.53	2.45	2.30	2.18	2.07	2.01	2.						

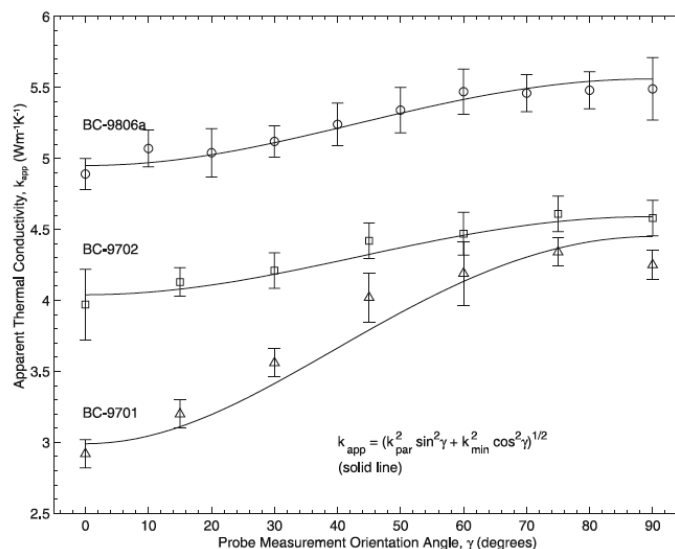
Figura 4.5. Conductivitat tèrmica de les roques per diferents temperatures (Font: “Thermal Conductivity and Specific Heat of Minerals and Rocks” (37)).

Table 8. Temperature effect on the thermal conductivity, $k$ , of rocks.																		
Rock	Ref.	$\rho$ $10^3 \text{ kg m}^{-3}$	$k \text{ [W m}^{-1} \text{ K}^{-1}]$															
			$T \text{ [}^\circ\text{C}]$ 0   50   100   200   300   400   500   600   700   800   900   1000   1100   1200   1300   1400															
Igneous rocks																		
Alkali Granite	Sak73	2.81	2.80	2.80	2.80	2.60	2.36	2.22	2.04									
Granite	Sak73	2.62	3.52	3.50	3.24	2.74	2.50	2.31	2.20									
	Bir40	2.61	3.52	3.27	3.01	2.70	2.45											
	Bir40	2.61	3.80	3.48	3.21	2.85												
	Bir40	2.65	2.79	2.61	2.47	2.30												
	Bir40	2.64	2.43	2.34	2.27	2.14												
	Moi68		2.00	1.70	1.37	1.19	1.08	0.99	0.92	0.89	0.88	0.84	0.84	0.88	0.89	0.97	1.05	
	Moi66				1.23		1.05		0.90		0.84		0.82		0.89	0.98		
	Hyn71			2.17	1.93	1.54	1.35	1.23	1.14	1.08	1.02	0.99	0.98	0.98	1.00	1.07	1.16	
Quartz Diorite	Sak73	2.72	2.52	2.68	2.60	2.38	2.20	2.09	2.02									
	Kaw64	2.64	3.56	3.37	3.24	3.06	2.93	2.85	2.83	2.81								
Syenite	Bir40	2.80		2.20	2.13	2.09												
Monzonite	Bir40	2.64	3.17	2.92	2.74	2.47												
Tonalite	Bir40	2.74	2.69	2.58	2.47	2.31												
Diorite	Kaw64	2.92	2.07	2.01	1.97	1.84	1.76	1.67	1.59	1.57	1.55							
	Hyn71			1.98	1.87	1.60	1.48	1.39	1.30	1.20	1.11	1.06	1.01	1.01	1.05	1.15		
Gabbro	Bir40	3.03	2.32	2.25	2.20	2.15												
	Bir40	2.86		1.93	1.95	1.99												
	Bir40	2.88	1.99	1.99	1.99	1.99	2.00	2.01										
(continued)																		

Figura 4.6. Conductivitat tèrmica d'algunes roques ígnies per diferents temperatures, augment de la figura anterior (Font: “Thermal Conductivity and Specific Heat of Minerals and Rocks” (37)).

Els càlculs que es realitzaran tant per la simulació amb COMSOL Multiphysics® com amb el model Excel requereixen els valors de la taula anterior amb unitats S.I.

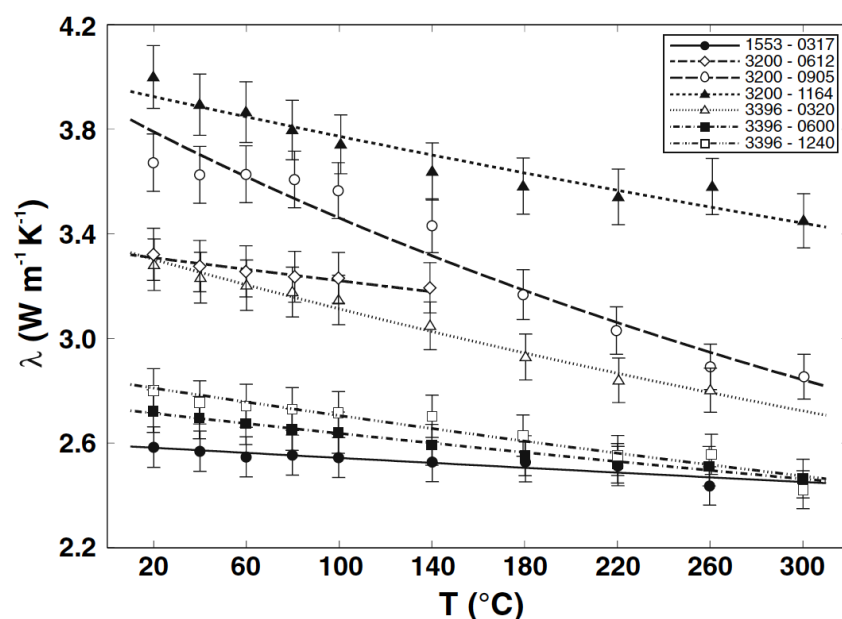
Es interessant veure a continuació què significa la variació dels valors de densitat i conductivitat tèrmica per una mateixa roca segons si està en “paral·lel” o en “perpendicular”. En el següent article, “*Thermal conductivity anisotropy of metasedimentary and igneous rocks*” (38), s’explica aquesta discordança lingüística i què significa en ambdós casos. La conductivitat tèrmica en paral·lel ( $k_{\text{par}}$ ) fa referència a aquella conductivitat heterogènia calculada amb la sonda paral·lela directament al tall realitzat sobre la roca, mentre que la perpendicular ( $k_{\text{perp}}$ ) fa referència a una orientació de la sonda de mesura que calcula tant la conductivitat paral·lela al tall de la roca com la perpendicular fent automàticament les operacions necessàries per obtenir el valor d’aquesta última. L’anisotropia, es defineix precisament com  $k_{\text{par}}/k_{\text{perp}}$ . La Figura 4.7 mostra com segons l’angle de mesura emprat per la sonda per calcular la conductivitat tèrmica el resultat d’aquesta pot variar per una mostra de la mateixa roca. (38).



**Figura 4.7.** Canvi de la  $k$  segons l’angle de mesura d’aquesta emprat per la sonda (Font: Thermal conductivity anisotropy of metasedimentary and igneous rocks” (38)).

Les tres línies de la Figura 4.7 corresponen a diferents mostres de roca, sent: BC-9806a argil·lita laminada, BC-9702 una barreja argil·lita/esquist laminat i BC-9701 una mostra diferent del mateix tipus de roca anterior. Tenint en compte aquesta consideració, la conductivitat tèrmica que convé triar pels estudis a realitzar és la més baixa possible, dimensionar sempre amb els valors més pessimistes que podrien ocórrer. Per aquest mateix motiu, s’agafaria el valor de conductivitat tèrmica en perpendicular en cas d’existir ambdós valors per una mateixa roca ígnia.

Finalment, és interessant veure com varien les conductivitats tèrmiques gràficament de diferents roques magmàtiques en funció exclusivament de la temperatura. Per no analitzar una sola mostra de roca, s'ha cercat un estudi que de forma molt intel·ligent ha volgut demostrar com pot variar la conductivitat tèrmica del terreny d'una zona geogràfica molt propera a l'altre. De totes formes, la informació a analitzar és com varien aquestes mostres de roca diferents, en la Figura 4.8. Com es pot veure clarament, totes les mostres segueixen un criteri de reacció respecte l'augment de la temperatura aplicat sobre aquestes totalment diferents, reafirmant que les taules de propietats de les roques han sigut determinades a base de molta experimentació i no amb equacions aplicables per tots els materials.



**Figura 4.8.** Canvi de la  $k$  segons les mostres aafades d'un mateix tipus de roca en zones geogràficament properes però diferents. (Font: "Temperature dependence of the relationship of thermal diffusivity versus thermal conductivity for crystalline rocks" (39)).

Posteriorment, es fa referència a diferents conceptes tractats en aquest apartat per la definició de la conductivitat tèrmica del terreny en el model d'exemple fet servir per modelitzar la captació energètica en una central volcànica amb les característiques que es plantejaran. D'aquesta forma es podrà trobar un model aproximat que determini la conductivitat tèrmica a diferents profunditats del pou de captació, vist que a mesura que el tub s'allunya de la cambra magmàtica la temperatura de la roca també disminuirà, fent augmentar la  $k$  al mateix temps.

## 5. Estudi de viabilitat

### 5.1. Modelització del procés de captació energètica

La modelització del procés de captació energètica és totalment necessària per dimensionar una central que permeti valorar si un projecte de central volcànica seria funcional al món real o no. L'estudi sempre es pot enfocar des d'un àmbit teòric com s'ha fet en els apartats anteriors, però aquest no és suficient per determinar si és possible generar electricitat a partir de la temperatura emmagatzemada provinent d'una cambra magmàtica en el subsòl que està en contacte amb aquesta. Cal, doncs, realitzar els diferents balanços energètics en les diferents parts de la central i estudiar-ne així la seva viabilitat.

En aquest apartat es tracten els aspectes possiblement més interessants d'aquest Treball de Final de Grau; que són els relacionats amb el dimensionament del sistema de captació (corresponent al circuit primari de l'aigua) per extreure una potència determinada de la roca mare d'una ubicació amb característiques concretes. Aquestes característiques o propietats, desgraciadament, no poden ser valors reals per una localització concreta, vist que per molt que s'han demanat són dades que no estan obertes a tots els públics i que en la majoria de casos estan en mans d'empreses privades que no les comparteixen gratuïtament. És comprensible que sigui així ja que, per posar un exemple, els perfils de temperatura del terreny des de la superfície fins una cambra magmàtica s'obtenen únicament amb la perforació sobre la mateixa roca i amb mesuradors de temperatura que permeten conèixer aquesta magnitud en funció de la profunditat, i aquest estudi és molt car. Un altre aspecte a tenir en compte és que la majoria d'aquestes perforacions realitzades per conèixer la temperatura de la roca en una zona concreta (que com s'ha vist anteriorment aquestes temperatures canvien fàcilment variant la ubicació geogràfica de l'estudi) han sigut realitzades amb l'objectiu de fer posteriorment perforacions de gran profunditat cap a pous de gas natural o petroli. Conèixer el perfil de temperatura del terreny és imprescindible pel grup d'enginyers que estigui duent a terme la perforació per refrigerar correctament les broques perforadores i treballar en les condicions de seguretat mínimes que permeten evitar el deteriorament o trencament dels equips emprats (vist que és material molt car i que requereix de molts usos per amortitzar-lo).

De totes formes, és perfectament plausible realitzar un model que s'assembli basant a la realitat sense tenir les dades reals. Òbviament, l'exactitud d'aquest model serà menor que un que operi amb dades reals del terreny. Com cap de les fonts consultades i empreses a les que hem demanat les dades ha pogut compartir-les (en la majoria de casos perquè no les tenien), el mateix model de captació d'energia tèrmica planteja formes de calcular el perfil de temperatura i altres magnituds que



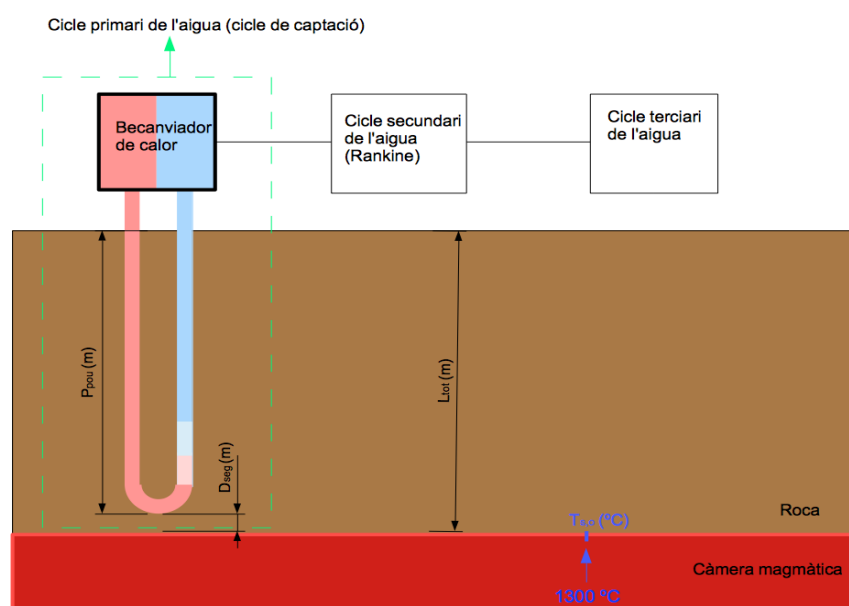
seran necessàries per dur a terme l'estudi; aproximant alguns valors importants pel desenvolupament dels càlculs (profunditat de la cambra magmàtica, temperatura de contacte amb la roca sòlida, profunditat del pou...).

### 5.1.1. Paràmetres bàsics del model de captació

Per realitzar els càlculs amb els softwares de tractament de dades i/o modelització del terreny (Excel i COMSOL Multiphysics® respectivament) s'han hagut de suposar algunes dades fonamentals per l'estudi. Totes elles depenen de les característiques de la roca mare existent sota la ubicació de la central volcànica i de la cambra magmàtica de la que se n'aprofita la temperatura. Els valors més importants per començar a realitzar aquest estudi són:

- A) Profunditat de la cambra magmàtica.
- B) Temperatura lliardar entre la magma i la primera roca sòlida en contacte amb aquest.
- C) Profunditat del pou realitzat (per tant la distància d'aquest fins la cambra magmàtica).
- D) Conductivitat tèrmica del terreny.
- E) Flux de calor per unitat d'àrea de captació.
- F) Característiques del tub de captació emprat (diàmetre, longitud aïllada i longitud de captació, conductivitat tèrmica en els diferents trams del tub...).
- G) Increment de temperatures en cada pou de captació

Abans de començar a definir tots aquests paràmetres, és una bona idea esquematitzar de forma senzilla com serà la central a modelitzar (veure la Figura 5.1). Com es pot veure, hi haurà tres cicles diferenciats d'aigua: El cicle primari o de captació, el cicle secundari o de Rankine (a partir del qual s'obté l'electricitat gràcies al gir de les turbines) i el cicle terciari o refrigeració.



**Figura 5.1.** Esquema simplificat de la central (Font: Pròpia).

El cicle que s'està analitzant és el cicle de captació; un cicle tancat on aigua a alta pressió absorbeix energia de la roca calenta resultant amb un augment de la temperatura (i per tant entalpia) de l'aigua que baixa freda per tub U en la primera fase i s'escalfa en la zona de captació. Per zona de captació s'estén aquella zona on el tub no està aïllat i per tant absorbeix l'energia en forma de calor que es transmet a l'aigua de captació del cicle primari.

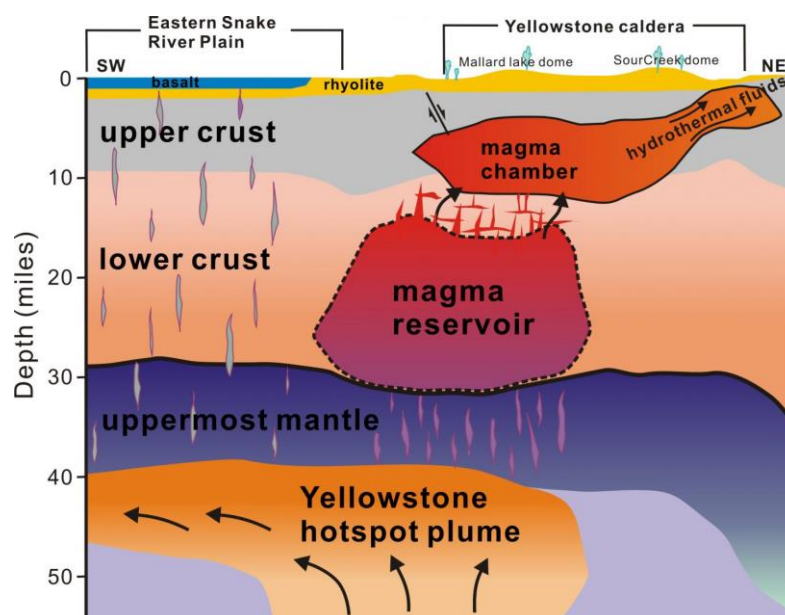
A continuació es decideixen, o es calculen en cas de que sigui necessari, els paràmetres comentats anteriorment per la central d'exemple desenvolupada en aquest projecte:

A) Profunditat de la cambra magmàtica.

La profunditat de la cambra magmàtica és molt important i afecta directament a la implementació d'una central volcànica. Això es deu, bàsicament, a que una cambra magmàtica situada a gran profunditat implicaria una perforació molt més prolongada. Així, caldria fer un pou molt més profund per assolir la mateixa temperatura que es podria obtenir a menys profunditat per una central ubicada sobre una cambra magmàtica poc profunda.

Per triar el valor d'aquesta profunditat, la millor opció és basar-se en les profunditats mitges a les que es solen ubicar les cambres magmàtiques i agafar un valor de rang baix (ja que si es fa una central volcànica ja es cercarà un lloc on la cambra magmàtica no estigui a massa profunditat). Normalment les cambres magmàtiques solen trobar-se a una profunditat compresa entre 1 km i 10 km. (40).

Malgrat això, es poden trobar cambres magmàtiques més properes a la superfície, i encara més fàcilment extensions d'aquestes que creen calderes a escassos metres de la superfície. Un cas molt conegut de gran cambra magmàtica amb extensions d'aquesta que s'apropen a la superfície és el del Yellowstone. La Figura 5.2 mostra una representació d'aquesta caldera amb l'objectiu de visualitzar de quin rang de profunditats s'està parlant en el cas d'una de les cambres magmàtiques més grans del planeta.



**Figura 5.2.** Distribució de les cambres magmàtiques de Yellowstone. (Font: The Yellowstone magmàtic System from the mantle plume to the upper crust”(41))

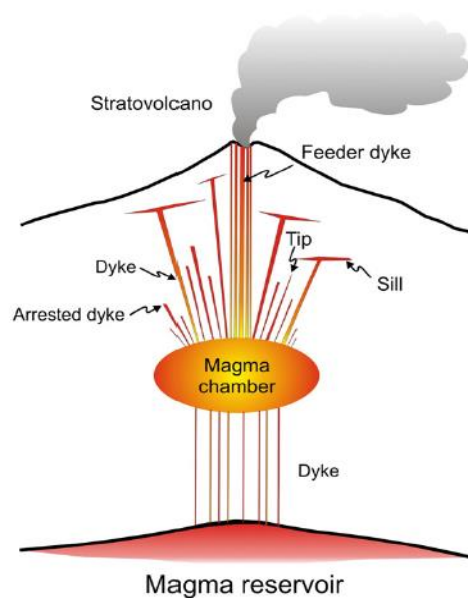
Cap destacar que el cas de Yellowstone és especial. Es tracta d'un volcà actiu amb dos grans cossos de magma subjacents. El primer el primer es troba a uns 5 km sota la superfície arribant a apropar-se molt més, i arriba fins a uns 17 km de profunditat; tenint una amplada màxima de 40 km i una longitud de 90 km amb un 15 % de magma en estat fos, (42). Segons la font anterior, la segona cambra encara més profunda és 4,5 vegades més gran que la anterior i s'estén dels 20 km als 50 km sota de la superfície, tenint només un 2 % de matèria fosa al seu interior.

No s'està cercant una cambra magmàtica tant gran, simplement es desitja trobar una cambra accessible (a no molta profunditat) i que tingui una elevada temperatura. Un exemple és el volcà de Geitafell, al Sud-Est d'Islàndia. Aquest té una cambra magmàtica que s'estén 4 km situada a només 2 km de profunditat; (43). A la mateixa font, on es descriuen diverses característiques de les cambres magmàtiques a partir de l'estudi de cambres reals, s'anomena un exemple encara més positiu de cara a la cerca d'una cambra poc profunda: També a Islàndia, es troba una formació de basalt creada per una cambra magmàtica situada a només 800 m de la superfície.

Vist que interessa un valor bo però realista, es tria una profunditat de la cambra magmàtica de 1000 m. El valor s'anota a la **Taula 5.2**. Aquesta profunditat està compresa entre les més comuns de les cambres magmàtiques, i per tant, no hauria de ser difícil trobar una localització bona per realitzar una perforació d'aquestes magnituds per instal·lar una central volcànica.

B) Temperatura llindar entre la magma i la primera roca sòlida en contacte amb aquest.

Un cop es coneix la profunditat de la cambra magmàtica, cal definir quina és la temperatura de la roca que està en contacte amb aquesta. Les cambres magmàtiques no solen tenir la totalitat de la matèria que es troba en el seu interior totalment fosa. Malgrat això, estan connectades d'alguna forma al mantell, considerant que quan es refreda el magma que es troba en contacte amb la roca de la que s'extreu energia, la pròpia energia interna de la Terra s'encarregarà de restituir aquesta energia perduda. En altres paraules, es considera una cambra magmàtica d'energia infinita que no es refreda amb les extraccions d'energia de la roca mare que contacte amb aquesta perquè realment el ritme de refredament és molt lent, i, en cas de tenir connexió directa amb el mantell, totalment menyspreable. El cas de Yellowstone és un cas especial, i per aquest motiu es va dir al principi d'aquest projecte que enginyers estatunidencs estan estudiant formes de refredar-la per evitar els danys irreparables que podrien ocórrer en cas que el supervolcà entrés en erupció. La Figura 5.3 mostra un exemple de cambra magmàtica amb connexió a reservori de magma del mantell.



**Figura 5.3.** Cambra magmàtica amb accés a un reservori de magma del mantell (Font: "Magma chambers: Formation, local stresses, excess pressures, and compartments," (43)).

Fent aquesta consideració – que la cambra tindrà accés al reservori de magma i en cas de refredar-se el propi magma refredat baixarà a l'haver augmentat la seva densitat, deixant lloc per magma calent que arriba de capes inferiors – només queda definir quina és la primera temperatura de la roca sòlida.

Recordant els valors de temperatures del magma descrits a la introducció d'aquest TFG, aquest es sol mantenir entre els 700 °C i els 1300 °C per estar en estat líquid. La pregunta és si la roca ígnia existent

a la localització de la central pot assimilar aquestes temperatures sense fondre's, la resposta és sí. La Figura 5.4 mostra el punt de fusió de varies roques ígnies.

Table 2.13 Melting points of some rocks

Rock	Melting point (K)	References
Basalts	~ 1,473	Adylov and Mansurova (1999)
Basic rocks with Fe# = 0.35	~ 1723	Yoder (1976)
Basic rocks with Fe# = 0.50	~ 1,503	Yoder (1976)
Basic rocks with Fe# = 1.00	1,273	Yoder (1976)
Basalt (beginning of melting at 0.1 MPa)	1,273	Yoder (1976)
Basalt	1,343	Hall (1995)
Basalt	1,413	Hall (1995)
Basalts	1,473	Faure (2000)
Basalt, gabbro	1,473	Bayly (1968)
Rhyolite, granite	1,073	Bayly (1968)
Granites	973–1,123	Attrill and Gibb (2003)
Granite	1,173	Hall (1995)
Granite	1,223	Hall (1995)
Komatiites	2,063	Grove and Parman (2004)
Andesite	1,373	Tamura et al. (2003)
Andesite	1,343	Hall (1995)
Eclogite	1,573	Anderson (2007)
Tonalite	1,173	Hall (1995)
Tholeiitic basalt <sup>a</sup>	1,423–1,498	Hall (1995)
Basaltic andesite <sup>a</sup>	1,293–1,383	Hall (1995)
Leucite basalt <sup>a</sup>	1,368	Hall (1995)
Rhyolite <sup>a</sup>	1,008–1,163	Hall (1995)
Rhyodacite <sup>a</sup>	1,173–1,198	Hall (1995)
Andesite pumice <sup>a</sup>	1,213–1,263	Hall (1995)
Dacite <sup>a</sup>	1,198	Hall (1995)
Peridotite	1,363	Faure and Mensing (2007)
MORB <sup>a</sup>	1,516–1,624	Falloon et al. (2007)
OIB <sup>a</sup>	1,559–1,645	Falloon et al. (2007)

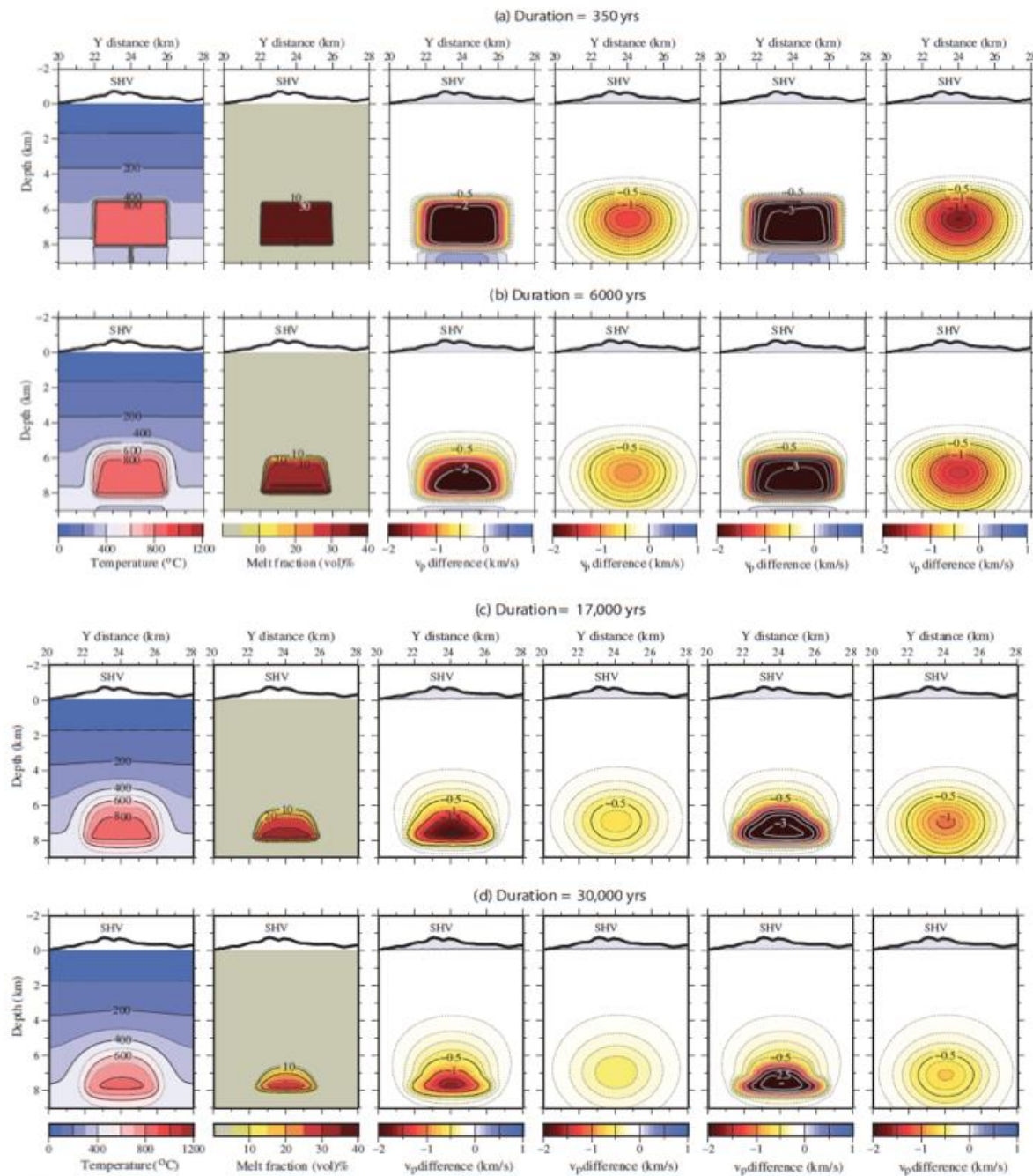
<sup>a</sup> Extrusion temperatures of lavas

**Figura 5.4.** Punts de fusió de varies roques ígnies (Font: "Applied Geothermics"(44)).

Com es pot apreciar moltes d'aquestes roques tenen un punt de fusió semblant al de la temperatura del magma (la majoria el tenen per sobre dels 1000 °C). Si no es troben foses com el propi magma a 800 °C, per ficar un exemple, és perquè un cop han cristal·litzat degut al refredament del propi magma que abans eren cal aplicar un més alta energia perquè tornin a ser magma. Per tant, es pot trobar magma a 700 °C encara fos en contacte amb una roca a aquella temperatura en estat sòlid (així es formen les cambres magmàtiques que emmagatzemen magma calent).

De totes formes, el rang de temperatures de les roques és més baix que el del magma (vist que és aquest qui li aporta l'alta temperatura a la que es troben). S'ha trobat a la revista *Oxford Academic* un article que precisament tracta la evolució de la cambra magmàtica d'un volcà al llarg de milers d'anys (incloent la variació de la seva temperatura i de la roca del seu voltant); (45). El volcà es troba a l'illa Montserrat (colònia anglesa al Carib) i es diu "Soufrière Hills Volcano". És interessant com el grup d'investigadors de la Universitat de Bristol ha calculat de forma aproximada com han variat els paràmetres de temperatura i la fracció de matèria fosa entre d'altres. La Figura 5.5 mostra els resultats d'aquest estudi per la cambra magmàtica d'aquest volcà 350 anys, 6000 anys, 17000 anys i

30000 anys després de la seva formació (amb especial interès per aplicar-ho al cas que ens ocupa en el primer gràfic a l'esquerra de cada un dels quatre casos, el de l'evolució de la temperatura).



**Figura 5.5.** Evolució de varis paràmetres de la cambra magmàtica del volcà “Soufrière Hills Volcano” després de 350, 6000, 17000 i 30000 anys després de ser formada. (Font: “Quantification of the intrusive magma fluxes during magma chamber growth at Soufrière Hills volcano” (45)).

Com es pot observar en els gràfics anteriors, la cambra magmàtica del volcà “Soufrière Hills Volcano” es troba aproximadament a 6 km de profunditat. Ja s’ha esmentat que en el cas del nostre estudi estarà més a prop de la superfície.

En quant la temperatura, aquest estudi serveix simplement com a un punt de referència. Inicialment la roca en contacte amb la cambra magmàtica (cas 350 anys) estava a 800 °C. Tanmateix, és més factible trobar una cambra més antiga ja que de forma contrària el implicaria una zona de vulcanisme molt actiu. Per aquest motiu, el millor és valorar una temperatura de la roca com la del volcà de l’estudi anterior a dia d’avui (30000 anys). Aquesta és d’aproximadament 600°C com es veu a la Figura 5.5

Per tant, és factible agafar una temperatura de 600 °C com la de la superfície de la roca propera al tub de captació, vist que no és de les més optimistes que es podien haver triat i permet assegurar una àmplia zona de captació per alimentar la central volcànica. El resultat s’apunta a la **Taula 5.2**.

C) Profunditat del pou realitzat (per tant la distància d’aquest fins la cambra magmàtica).

El pou ha d’arribar fins a una profunditat que permeti extreure la màxima energia possible deixant una distància de seguretat mínima amb la cambra magmàtica. No s’ha trobat un criteri definit que digui fins a quin distància d’aquesta és segur perforar per ficar el tub en U, però és evident que deixar un marge entre la primera aparició de magma i el tub és una bona forma de realitzar una perforació amb pocs riscos i d’assegurar la perdurabilitat del material de captació implementat al llarg del temps. A més, aquest espai deixat sense modificar evita un impacte massa directe amb la formació geològica existent; permetent que per les pròpies lleis de la transferència de calor la central pugui extreure energia de forma continuada al llarg de molts anys sense saturar ni refredar el terreny de forma que s’hagués de parar la producció.

Tenint en compte que el rang de temperatures serà molt gran els primers 200 m superiors a la cambra magmàtica, s’ha optat per deixar una distància de seguretat de 30 m. D’aquesta forma la profunditat del pou serà la que es veu a l’Eq. 5.1, on es calcula la profunditat del pou ( $P_{pou}$ ) en funció de la profunditat on es troba la cambra ( $L$ ) i la distància de seguretat ( $D_{seg}$ ).

$$P_{pou} = L - D_{seg} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

La profunditat del pou, i per tant del tub en U, serà de 970 m. El resultat s’anota a la **Taula 5.2**. Amb la simulació amb COMSOL Multiphysics® es veurà que la distància de seguretat és suficient pels motius explicats en l’apartat corresponent a la simulació.

Serà interessant conèixer a continuació com afecta la conductivitat tèrmica de la roca que s’ha explicat amb bastanta profunditat en apartats anteriors, presentada a continuació com a paràmetre bàsic.



#### D) Conductivitat tèrmica del terreny.

La determinació d'aquest paràmetre és bastant interessant, perquè, com s'ha vist en l'apartat de "Canvis segons el tipus de roca existent a la ubicació de la central", la conductivitat tèrmica depèn de la temperatura a la que es troba la roca. Cap recordar les conclusions que s'han assolit en aquell apartat respecte la  $k$ :

- ❖ Es negligeix l'efecte de la pressió sobre la conductivitat tèrmica vist que només existeix de forma clara quan la roca ígnia es troba a baixa temperatura (recordar el cas del "Suprasil W2").
- ❖ La conductivitat tèrmica de les roques ígnies (com qualsevol altre sòlid) està relacionada amb la temperatura a la que aquest es troba. En el cas de les roques magmàtiques mostrades a les taules de propietats es va veure com a l'augmentar la temperatura la conductivitat tèrmica de la roca es reduïa.

D'aquesta manera, el primer pas es definir sobre quina base rocosa està construïda la central, és a dir, quina és la roca que envolta la cambra magmàtica i que cal perforar. La roca triada per l'estudi ha de ser algun tipus de roca ígnia (dunita, basalt, gabre, olivenita, periodita, lherzolita, granit...). Dintre d'aquesta categoria es selecciona una base rocosa basada en dunita "Kaw64" (que és la referència que descriu del lloc i característiques de formació de la roca (37)). Aquesta tria ha sigut basada en que és una roca bastant comú i amb una conductivitat tèrmica bastant estandarditzada; ni està entre les més altes ni entre les més baixes.

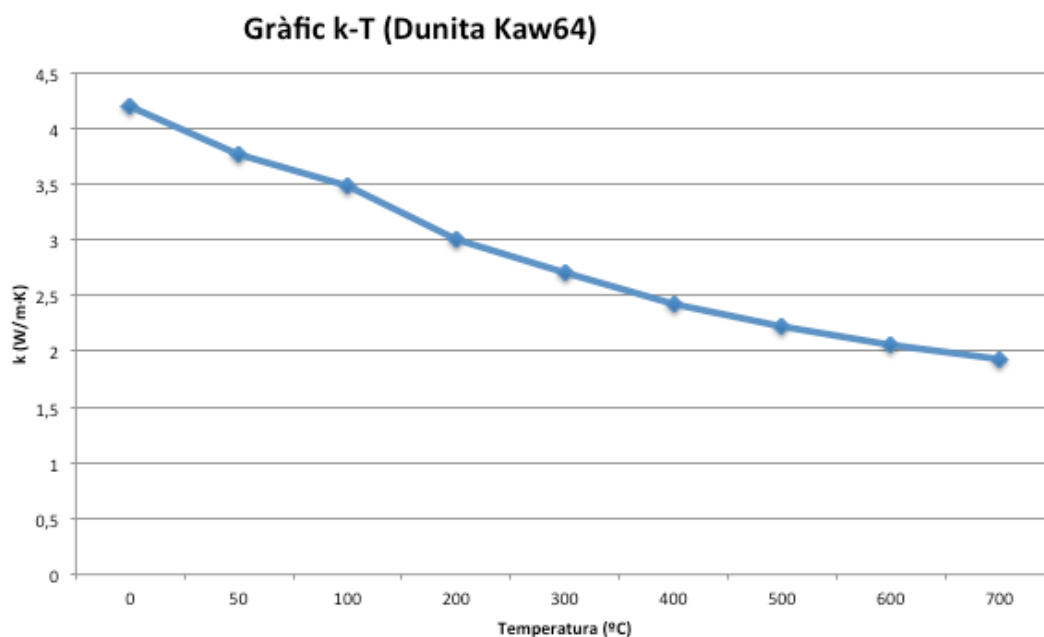
A la **Taula 5.1** es veuen els valors de conductivitat tèrmica per diferents temperatures per dunita Kaw64 (extrets de les taules de la Figura 4.5).

Temp (°C)	0	50	100	200	300	400	500	600	700
$k$ (W/m·K)	4,19	3,77	3,48	3,01	2,7	2,43	2,22	2,05	1,93

**Taula 5.1.** Conductivitat tèrmica de la dunita en funció de la temperatura. (Font: "Thermal Conductivity and Specific Heat of Minerals and Rocks"(37)).

Es podria triar una roca de les que es tinguessin més dades de conductivitats tèrmiques per temperatures més elevades, però degut a les restriccions del sistema, no es superarà en cap moment els 700 °C en la roca mare a estudiar (de fet ni els 600 °C). Fent una representació gràfica (Figura 5.6) s'obté la distribució de  $k$  en funció de  $T$ .





**Figura 5.6.** Gràfic de la conductivitat tèrmica en funció de la temperatura per dunita Kaw64 (Font: Pròpia).

Al mateix model del sistema en Excel s'implementa un càlcul automàtic que permet calcular la conductivitat tèrmica a una temperatura determinada  $T_x$  ( $0 \leq T_x \leq 700$  °C) interpolant entre els punts coneguts que es troba. Una altra forma de calcular aquesta conductivitat tèrmica seria mitjançant una recta polinòmica que calcularia de forma aproximada el valor de  $k$  segons el valor de  $T_x$ ; però s'ha observat que l'error acumulat és massa gran. Malgrat això, a continuació es mostra l'equació d'aquesta recta:  $k(T_x) = 4 \cdot 10^{-6} \cdot T_x^2 - 0,0059T_x + 4,0915$  ( $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

A continuació s'explica com s'ha trobat la conductivitat tèrmica mitja mitjançant un procés iteratiu basat en la definició del perfil de temperatures des de la cambra magmàtica fins la superfície.

#### **Perfil de temperatures del terreny:**

Tot i que amb la simulació amb COMSOL Multiphysics® es determinarà un perfil de temperatures del subsòl més precís, es requereix amb anterioritat determinar la conductivitat tèrmica mitja del terreny. Per aquest mateix motiu, es modelitza un sistema que permet calcular la conductivitat tèrmica mitjana de la roca fent precisament la mitja de les  $k$  per segments d'igual longitud que cobreixen tota la profunditat des de la superfície fins la cambra magmàtica.

El primer pas per fer això és definir un model que permeti valorar numèricament com afecta la presència de la cambra magmàtica al propi terreny on es troba. Per aquest motiu, es començaran fent quatre consideracions:

- A) S'assumeix que existeix el sistema cambra base rocosa tal i com existeix a la natura, sent la roca considerada com una paret plana de longitud superfície-cambra magmàtica formada per una sola roca (Dunita Kaw64) i sense cap element que pertorbi la distribució de temperatura de la cambra a la roca. En altres paraules, el sistema de captació i la pròpia central encara no es consideren en aquesta primera aproximació de la conductivitat tèrmica segons la profunditat (que alhora té associada un perfil de temperatures que a continuació aproximarem). Això també implica que la cambra magmàtica és l'única font d'energia disponible.
- B) Tot i que la distribució de la temperatura en funció de la profunditat no és lineal, es considera que és constant en segments de 1 m. D'aquesta forma no cal tenir una funció que descrigui amb exactitud la variació de la temperatura en funció de la profunditat, sinó que es pot treballar coneixent la temperatura metre per metre, considerant-la igual dintre de cada segment (òbviament variarà entre segments).
- C) Els segments definits de 1 m es consideren infinits, sent la temperatura és igual en tot el volum d'un segment o capa. Això implica estudiar el subsòl com un sistema amb capes de volum infinit amb igual temperatura per capa (en cas de ficar tubs paral·lels serà molt útil considerar la mateixa temperatura a la mateixa profunditat, i no valorar variacions en l'eix horitzontal).
- D) La conducció és en estat estacionari, unidireccional (de la cambra cap la superfície), no hi ha generació en la roca i la conductivitat tèrmica es considera constant per aquest càlcul.

Dit això, es pot començar a dissenyar un perfil de temperatures aproximat. Com s'ha dit anteriorment, es considera una paret plana de longitud igual a la profunditat de la cambra magmàtica (1000 m). L'afectació que té la temperatura exterior de l'aire sobre el perfil de temperatures (degut a l'energia que pugui transferir per convecció) és mínima. Per això es consideren condicions estàndards com poden ser les d'aire a 20 °C i amb un coeficient de convecció ( $h_{\text{aire}}$ ) igual a 30 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>.

La temperatura de la superfície calenta d'aquesta "paret plana" formada per tot el gruix de roca és la definida anteriorment igual a 600 °C ( $T_{s,0}$ ). La temperatura de la roca a la superfície es considera de 15°C ( $T_{s,1}$ ). Aleshores, suposant una conductivitat tèrmica del terreny mitja igual a 2,7 (vist que és el valor de  $k$  per 300 °C, que són la meitat de 600°C) es comença calculant quin seria el flux mig de calor en funció d'unitat d'àrea,  $q''_{\text{mitja}}$  (W/m<sup>2</sup>), amb les dades presentades anteriorment: **Eq. 5.2.**

$$q''_{\text{mitja}} = \frac{T_{s,0} - T_{s,1}}{Rt''_{\text{mitja}}} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

De l'equació anterior es desconeix el valor de  $Rt''$ , és a dir, la resistivitat mitja del terreny per unitat d'àrea. Vist que s'ha deduït la conductivitat tèrmica mitjana constant ( $k_{mitja}$ ) per tota la "paret plana" formada per la base rocosa, la resistivitat ( $K \cdot m^2/W$ ) es calcula amb l'Eq. 5.3 corresponent a la resistivitat tèrmica d'una paret plana en funció de la longitud de paret (la profunditat de la cambra magmàtica) i la conductivitat tèrmica.

$$Rt''_{mitja} = \frac{L}{k_{mitja}} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

D'aquesta forma, es resolen ambdues equacions pels valors suposats. Un cop es té aquest flux de calor mitjà i considerat uniforme al llarg de tota la roca mare, es calcula el perfil de temperatures a partir de l'expressió bàsica de la conducció (desenvolupament extret de (46)). Alguns dels paràmetres d'aquest procediment han sigut introduïts en l'Eq. 3.2.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{in} + \dot{E}_{generada} - \dot{E}_{out} &= \dot{E}_{emmagatzemada} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot Cp \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \\ \rightarrow Si k = ct &\rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow Si \text{ és amb una sola direcció } \rightarrow \frac{dT}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \rightarrow \\ T(x) &= C1 \cdot x + C2 \rightarrow T(0) = T_{s,0}; T(L) = T_{s,1} \rightarrow T_{s,0} = C2; T_{s,1} = C1 \cdot L + C2 = C1 \cdot L + \\ T_{s,0} &\rightarrow C2 = \frac{T_{s,1} - T_{s,0}}{L} \rightarrow T(x) = (T_{s,1} - T_{s,0}) \frac{x}{L} + T_{s,0} \end{aligned}$$

On els paràmetres nous introduïts són:

- $\dot{E}$  = Energia per segon (J/s) = potència (W)
- $T = u$  (Eq. 3.2) = Temperatura (K)
- $\dot{q}$  = Potència generada externament (W)
- $x$  = posició en la "paret plana" platejada (m)
- $C1$  i  $C2$  = Coeficients per resoldre l'equació (K/m) i (K) respectivament

Per tant, considerant que la transmissió es fa des de la cambra ( $T_{s,0}$ ) a la superfície ( $T_{s,1}$ ) el perfil de temperatures es pot calcular amb l'Eq. 5.4 o també amb l'Eq. 5.5 que relaciona el flux de calor calculat anteriorment amb la distància des de la cambra magmàtica fins al segment del que es vol calcular la temperatura ( $x$ ). Es calcula la temperatura per tots els segments de 1 m.

$$T(x) = (T_{s,1} - T_{s,0}) \frac{x}{L} + T_{s,0} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

$$T(x) = T_{s,0} - q''_{mitja} \cdot \frac{x}{k_{mitja}} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

Quan ja es tenen les temperatures dels 1000 segments (vist que la profunditat és de 1000 m), es fa una interpolació per cada temperatura per calcular la conductivitat tèrmica associada a aquella temperatura. S'implementa a l'Excel una funció que segons entre quines temperatures amb

conductivitats tèrmiques conegudes es trobi la temperatura del segment en qüestió, interpoli entre aquestes temperatures i les conductivitats tèrmiques associades a les mateixes. Així es coneixerà de forma aproximada quina conductivitat tèrmica va associada a cada segment.

Finalment, es calcula el valor mig de les 1000 conductivitats tèrmiques calculades de forma que es pot conèixer la conductivitat tèrmica mitjana real de la base rocosa. Aquesta iteració convergeix al primer intent i dona una conductivitat mitjana bastant propera a la suposada inicialment, igual a  $2,68 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . El valor és anotat a la **Taula 5.2**. També s'anota la densitat d'aquesta roca ( $3210 \text{ kg/m}^3$ ) així com el seu calor específic  $C_p$  ( $0,95 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

#### E) Flux de calor per unitat d'àrea de captació.

Amb el valor de les conductivitats tèrmiques de cada segment calculades anteriorment es calcula per cada segment, seguint amb el model anterior, el flux de calor de la roca en aquell metre de dunita Kaw64. D'aquesta forma, s'obtenen 1000 valors de fluxos de calors que varien en funció de la profunditat.

Per calcular el flux de calor mitjà de la roca mare (de tota la "paret plana" que s'ha considerat), es pot fer la mitja de tots els valors obtinguts per tots els segment o bé aplicar l'Eq. 5.2 i l'Eq. 5.3 amb la conductivitat tèrmica mitjana calcula anteriorment. El resultat obtingut és de  $1,5675 \text{ W/m}^2$ , i s'anota a la **Taula 5.2**.

#### F) Increment de temperatures en cada pou de captació

Un altre paràmetre bàsic que cal tenir en compte a l'hora d'analitzar els valors més importants dels tubs de captació és l'increment de temperatura que es desitja assolir a cadascun d'aquest. Es farà la següent consideració que es molt important per tots els càlculs realitzats en els pròxims apartats:

- A cada tub de captació l'increment de temperatura és el mateix; això és degut a que com s'ha dit en apartats anteriors la temperatura del terreny està inicialment distribuïda de forma uniforme en plans infinits o capes segons la profunditat (generant els segments de metre amb temperatura uniforme a cada segment). El cabal màssic d'aigua que prové de la sortida del bescanviador entre els circuits primari i secundari es bifurca en els diferents pous i en tots ells les condicions d'entrada són les mateixes, i, al ser iguals les del terreny, l'increment de temperatura es considerarà idèntic en cada tub en U instal·lat amb la mateixa superfície de captació requerida.

La temperatura que es tria per l'entrada i sortida dels tubs de captació prové d'uns càlculs realitzats amb l'Excel on es dimensionava el cicle de Rankine. Per poder generar la potència que es volia generar sota les especificacions del cicle de Rankine i del bescanviador que es veuran posteriorment, i

amb els cabals màssics triats i els provinents dels càlculs realitzats en el bescanviador de vapor conformat pel generador de vapor i el reescalfador, es requereix una temperatura d'entrada al bescanviador de 340 °C i s'extreuen 80 °C resultant una de 260 °C. Per tant, aquest 80 °C perduts han de ser recuperats a cada pou, de forma que:

- Temperatura d'entrada a un pou: 260 C.
- Temperatura de sortida del pou: 340 °C (en cas de no assolir-la es pujarà el cabal màssic complir amb l'energia que requerida al bescanviador).

Un cop captada la calor, els cabals màssic d'aigua desviats per cobrir els diferents tubs s'ajuntaran tots en un sol flux que es dirigirà als bescanviadors de calor. Aquests càlculs es poden veure a l'apartat corresponent al grup de captació del "Disseny de la central". Els valors de les temperatures anteriors s'anoten a la **Taula 5.2**, així com la pressió a la que es troba l'aigua (150 bar).

G) Característiques del tub de captació emprat (diàmetre, longitud aïllada i longitud de captació, conductivitat tèrmica en els diferents trams del tub...).

En quant les característiques del tub emprat, a priori no hi ha cap relació amb el propi terreny per a la tria dels seus paràmetres bàsics (diàmetre, material, longitud de captació...). Tanmateix, aquesta relació existeix i és important tenir-la en compte per alguns paràmetres concrets.

El diàmetre de tub emprat, per exemple, no té relació amb el terreny. Més aviat es triarà un diàmetre estandarditzat per tubs d'aigua a alta pressió i temperatura que pugui suportar les condicions a la que es sotmet aquesta. Per aquest motiu, el diàmetre estarà limitat pel màxim diàmetre que pot suportar la pressió a la que es sotmès el fluid de captació (a major radi del tub major pressió s'aplica sobre les parets d'aquest). Vist que independentment del diàmetre que es tria es podrà regular el cabal màssic total que arriba al bescanviador entre el cicle primari i el cicle secundari simplement fiant més o menys pous de captació, es tria un diàmetre interior de tub equivalent a 60 cm per l'estudi que es durà a terme a les posteriors simulacions. Aquest valor s'apunta a la **Taula 5.2**. El valor d'aquest diàmetre variarà si la simulació no dóna els resultats esperats i és incompatible amb l'augment de temperatura plantejat.

En quant el material del tub, s'ha de triar un material amb alta conductivitat tèrmica perquè hi hagi la mínima resistivitat a l'intercanvi de calor per conducció entre la roca calenta i el tub i d'aquesta forma es transmeti el màxim flux de calor possible (sempre amb materials que entrin dintre del pressupost triat pel constructor de la central). Vist que es considerarà una  $k$  molt alta pel material del tub en la part no aïllada, es fa la següent consideració:

- En la simulació amb COMSOL Multiphysics®, el tub serà d'un material aïllant de diàmetre intern igual a 60 cm i de diàmetre extern idèntic, d'aquesta forma no es considera l'efecte de la resistivitat tèrmica del propi tub vist que la del volum de control de la roca és molt major i permet poder negligir la que deriva del tub en U. En altres paraules, es negligeix el grossor del tub i el material de que pugui estar fet de cara a la simulació perquè el seu efecte sobre l'increment de la temperatura de l'aigua i sobre el terreny que envolta al tub serà mínim.

Per altra banda, hi ha un paràmetre molt important a tenir en compte pels tubs de captació que és la longitud aïllada del propi tub que es suposarà amb un aïllament perfecte (i per tant que l'aigua que passa per aquestes zones no perdrà temperatura). Tenint en compte que tota la longitud del tub està aïllada o no està aïllada, la longitud restant a l'anterior suposarà tota la longitud de captació del tub.

En quant a aquestes longituds, no es poden determinar abans de fer la simulació, sinó que es determinen amb aquesta. El procediment a seguir és molt senzill:

- El tub de captació començarà a estar aïllat fins el punt on la temperatura del subsòl en contacte amb el propi tub és major a la temperatura de l'aigua que circula pel tub. Aquesta temperatura ha sigut determinada anteriorment i equival a 260 °C, que és la temperatura de sortida que es desitja pel generador de vapor i el reescalfador (cabals que s'ajunten) de l'aigua del cicle primari emprada per escalfar la del cicle de Rankine en varis punts. En la simulació, doncs, es veu fins a quina profunditat la roca mare està a menor temperatura que 260 °C i en el moment que supera aquest valor el tub deixarà d'estar aïllat.
- El tub en U tindrà tota la part de baixada sense aïllar fins el final un cop s'entra en la zona de captació, vist que a major profunditat hi ha també majors temperatures. Ara cal conèixer el punt a la part de pujada en que el tub deixarà de intercanviar calor perquè la temperatura de l'aigua que circula per aquest supera la de la base rocosa. Per aquest motiu, l'aigua ha d'arribar fins la temperatura d'entrada als bescanviadors de calor entre els circuits primari i secundari que s'ha definit anteriorment i que equival a 340 °C. En el moment que per la velocitat de circulació de l'aigua estudiada aquesta assoleixi aquesta temperatura i la de la roca sigui menor, s'aïllarà el tub de captació. Com el sistema estarà ben dimensionat, aquest punt es trobarà en la part de pujada del tub en U, després d'haver passat ja per la zona més propera a la cambra magmàtica.

Per tant, els valor de les longituds tant de captació com d'aïllament del tub es determinen a la simulació com es veurà a continuació, realitzada per diferents velocitats de pas de l'aigua i triant la que més ens interessa per dimensionar la central i millor s'adapta a les seves especificacions.

Paràmetres bàsics del model de captació	
Profunditat de la cambra magmàtica (m)	1000 m
Temperatura magma-primera roca sòlida (°C)	600 °C
Profunditat del pou realitzat (m)	970 m
Conductivitat tèrmica mitja de Dunita Kaw64 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$2,68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Densitat de la Dunita Kaw64 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$3210 \text{ kg}/\text{m}^3$
Calor específic de la roca ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$0,95 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Flux de calor mitjà de la roca per unitat d'àrea de captació ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$1,5675 \text{ W}/\text{m}^2$
Temperatura d'entrada als tubs de captació (°C)	260 °C
Temperatura e sortida dels tubs de captació (°C)	340 °C
Diàmetre dels tubs en U (cm) → (Varia en posteriors simulacions)	60 cm
Pressió de l'aigua de captació (bar)	150 bar

**Taula 5.2.** Paràmetres bàsics del model de captació requerits per poder realitzar la simulació. (Font: Pròpia).

### 5.1.2. Modelització amb COMSOL Multiphysics®

#### 5.1.2.1. Introducció al model

L'objectiu de la simulació realitzada amb COMSOL Multiphysics® és la determinació de les característiques bàsiques del flux d'aigua que passa per un únic pou de captació (cabal màssic requerit i velocitat de l'aigua per assolir l'increment de temperatura de 80 °C, evolució de la temperatura de l'aigua al llarg del tub, potència que aquest flux absorbeix del terreny...). Per tant es crea un entorn simulat que permet estudiar quina interacció tindria un flux d'aigua de temperatura inicial 260 °C en el subsòl que segueix els paràmetres descrits en els apartats anteriors. Conseqüentment, serà possible saber quants pous de captació seran necessaris perquè la central acabi proporcionant una potència d'aproximadament 50 MW, ja que la simulació permet saber la potència proporcionada per cada tub en U.

Tenint en compte els resultats anotats a la **Taula 5.2**, es va realitzar una primera simulació per la part de baixada del tub en U amb el software COMSOL Multiphysics®, que té una part dedicada exclusivament a l'estudi termodinàmic d'un entorn definit. Aquesta part es troba recollida dintre dels mòduls d'estudi de transferència de calor (mòdul "*Heat Transfer*") i de dinàmica de fluids (mòdul "*CDF*") del propi software.

El programa té incorporades les relacions termodinàmiques que pertocquen pels diferents mètodes de transferència de calor que existiran en l'entorn simulat (per exemple, si es fa passar aigua pel tub el programa calcularà l'increment de temperatura associat a l'aigua per una distància concreta que en deriva de la convecció amb la roca calenta que envolta el tub, al mateix temps limitada pel ritme

de restitució de calor de la roca provinent de la conducció entre aquesta i la cambra magmàtica). La distància mínima entre la que el propi programa farà els càlculs es pot reduir a canvi de que la simulació trigui més temps a fer-se, en altres paraules, es pot fer un estudi més detallat i amb resultats a escales de profunditat més petites però per contrapartida COMSOL Multiphysics® haurà de realitzar molts més càlculs alentint el temps de simulació.

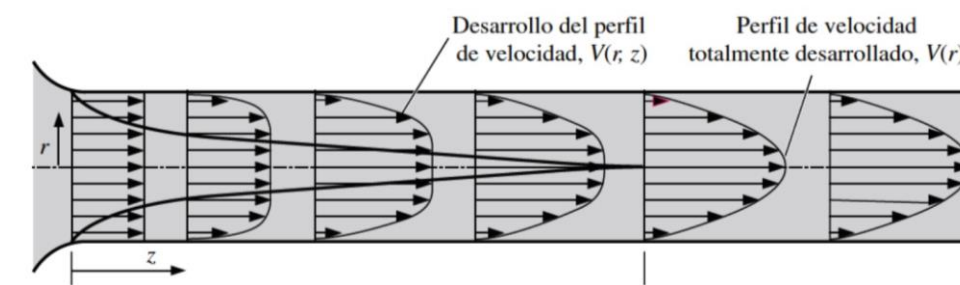
No es considera necessari explicar els passos que s'han seguit dintre del software per dur a terme les simulacions, vist que n'hi ha molts a realitzar i l'important és veure quins són els resultats obtinguts per un entorn definit. Aleshores és necessari, abans de passar a comentar directament els resultats obtinguts, veure quin és aquest entorn definit i quins valors s'han canviat respecte els obtinguts amb els paràmetres bàsics exposats anteriorment per la simulació de l'entorn final.

L'entorn ve delimitat per un rectangle gran corresponent a la superfície de terreny a estudiar, que és una àrea lo suficientment gran de la Dunita Kaw64 i per malles internes que permeten calcular les variacions que s'aniran produint en la roca per l'efecte del tub en U. Aquestes malles són molt petites i impossibles de veure en la figura complerta, vist que són molt petites a l'interessar una gran quantitat d'elles per tenir resultats molt apurats, al mil·límetre. El rectangle gran ha de ser de la profunditat a estudiar, per tant, des de 0 (superfície) a -1000 m (localització de la cambra).

En quant el tub, hi ha un aspecte molt important a tenir en compte que ja s'ha esmentat en apartats anteriors; i és que aquest estarà totalment aïllat fins que la temperatura de l'aigua que circula per aquest no sigui inferior a la de la roca mare que envolta el tub. L'estudi que s'ha fet per determinar la conductivitat tèrmica mitjana de la Dunita Kaw64 mostrava que considerant un perfil de temperatures per una  $k_{mitja}$  no variable la base rocosa superava els 260 °C a partir dels 419 m de profunditat. Per tant, els primers 419 m ni es tindran en compte a la simulació, vist que la roca mare no assoliria la temperatura mínima ni sense la presència del tub que refreda aquesta roca en les capes més properes al propi sistema de captació.

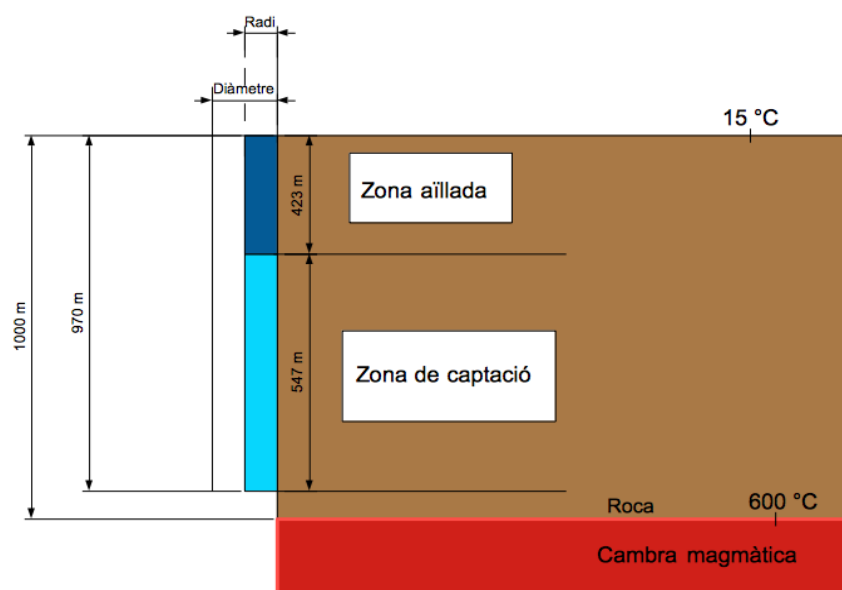
Seguint amb el tub, només s'analitza des del seu centre fins un extrem del tub (per tant la distància que es veu és el radi). Aquesta consideració es fa perquè l'estudi d'interacció tub-subsòl és igual per qualsevol pla en l'eix  $y$  ( $z$  en el programa) independentment de l'angle d'estudi respecte l'eix d'ordenades: En altres paraules, independentment del pla de la secció transversal que s'agafi que talli tant per qualsevol punt del perímetre com el centre de la circumferència que descriu el tub, el perfil de temperatures del subsòl descrit un cop es simuli el pas de l'aigua serà igual per tots els infinits plans. D'aquesta manera, la simulació es fa en un pla 2D axisimètric on l'eix de simetria està centrat al tub. En quant la temperatura de l'aigua als extrems del tub (on la velocitat del fluid també és zero per les lleis de la mecànica de fluids) serà més alta que al centre. La Figura 5.7 mostra com és el perfil de velocitats quan ja està totalment desenvolupat, com serà el cas en totes les parts del tub estudiades.





**Figura 5.7.** Perfil de velocitats per un flux fluid no desenvolupat (el primer a l'esquerra) fins un totalment desenvolupat (l'últim a la dreta). (Font: slideshare.net (47)).

Tornant a les temperatures, d'aquesta forma el software emprat permet calcular el perfil de temperatures real en les infinites seccions en els plans de l'eix  $y$  que tallen el tub des del seu centre fins un punt suficientment allunyat del tub perquè no es vegi afectat per la davallada de temperatura que deriva de la captació realitzada pels propis tubs. La Figura 5.8 permet veure aquesta idea de l'entorn que s'està començant a definir i la disposició tub-subsòl (recordar que només s'arriba fins el centre del tub). S'ha fet la Figura 5.8 amb el programa d'edició de dibuixos de Open Office que s'ha fet servir en altres figures al llarg d'aquest projecte, amb l'objectiu que es pogués visualitzar millor com es descriu l'entorn al tub a COMSOL Multiphysics®; vist que en aquest propi software el tub apareix tant petit en confront a la zona de terreny estudiada que resulta impossible de veure en la imatge que apareix en la descripció de l'entorn abans de rebre els resultats de la simulació. D'aquesta manera s'han pogut canviar les escales fent-les irreals però permetent fer comprensible la representació d'aquesta idea de descripció de l'entorn tub-base rocosa.



**Figura 5.8.** Esquema bàsic de l'entorn simulat que s'ha creat, disposició del tub al subsòl. (Font: Pròpia).

### Teoria incorporada al programa:

El programa emprat per la simulació fa servir fórmules de transferència de calor per calcular amb exactitud els valors dels paràmetres que es demanen al propi programa sempre i quan pugui trobar els resultats amb les dades disponibles. Si bé és cert que no és recomanable ni necessari entrar en detall en totes les fórmules implicades en els càlculs, sí que podria ser interessant comentar les més importants. Com ja s'ha vist hi ha expressions per determinar la conducció de calor des de la cambra magmàtica per la roca i diferents paràmetres que en deriven; Eq. 3.2, **Eq. 5.2**, **Eq. 5.3**... Tanmateix, les expressions que encara no s'han introduït i que són bàsiques per determinar la convecció que té lloc entre les parets del tub de captació i l'aigua són les que es veuen a continuació.

Retornant al tractament de dades que realitza COMSOL Multiphysics® per realitzar les operacions, el que fa el programa és utilitzar un mètode de càlcul amb elements finits. Bàsicament es discretitza l'espai formant una malla de càlcul, que tindrà diferent mida d'element segons la zona d'estudi. En les zones on hi ha més variabilitat de les magnituds a estudiar es defineix una malla més fina i on els canvis són menors es defineix una malla més gruixuda que precisa menys els resultats respecte la fina. Les equacions de transferència de calor i les de mecànica de fluids (Navier-Stokes) i els models de turbulència de l'aigua, ja estan implementats en l'entorn de treball del software en qüestió.

En aquesta part de la memòria es determinen aquelles fórmules que el programa ja té programades a l'hora de fer la simulació però que val la pena mencionar des del punt de vista teòric de l'estudi, ja que resulten bàsiques per qualsevol estudi on intervé una convecció amb un fluid com és l'aigua.

Important: Totes les expressions obtingudes a continuació es consideren l'aplicació general i es poden trobar, per exemple, al llibre "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" a (46).

L'aigua anirà variant les seves propietats segons avanci pel tub. De fet en una mateixa secció també varien segons la posició que es troba en aquesta secció (recordar, com s'ha vist a la Figura 5.7 on es veia com es distribueix la velocitat del fluid). Hi ha paràmetres que depenen directament de la velocitat de l'aigua, el primer que cal determinar sempre per poder fer càlculs dels coeficients de convecció posteriorment és el nombre de Reynolds (Eq. 5.6).

$$Re_D = \frac{\rho_f \cdot u_m \cdot D}{\mu} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

On:

- $\rho_f$  = Densitat del fluid tèrmic ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\mu$  = Viscositat absoluta del fluid tèrmic ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ )
- $D$  = Diàmetre del tub (m)
- $\dot{m}$  = Cabal màssic de fluid tèrmic circulant pel tub ( $\text{kg/s}$ )

- $u_m$  = Velocitat del fluid tèrmic circulant pel tub (m/s)

Els casos possibles de classificació del fluid segons els resultats obtinguts són 3:

1. El número de Reynolds és inferior a 2300: El fluid és de tipus laminar.
2. El número de Reynolds és major a 2300 però menor a 10000: El fluid és de tipus turbulent però no ha assolit una condició de turbulència completa.
3. El número de Reynolds és major a 10000: El fluid és completament turbulent.

Depenent de en quin cas dels anteriors estigui l'aigua, les expressions per determinar altres números com el número de Prandtl i el número de Nusselt varien. A més, tant el número de Prandtl ( $Pr$ ) com el número de Nusselt ( $Nu$ ) depenen de la pressió i la temperatura a la que es trobi l'aigua de captació. Aquests valors no són més que relacions obtingudes a base d'experimentació, i es simulen per l'aigua en cada punt d'estudi inclòs dintre de milers de malles (d'aquí que les simulacions triguin tant en compilar, requereixen la realització de molts càlculs).

Seguint amb aquest anàlisi teòric de la convecció, com es realitzarien els càlculs manualment, el següent pas sempre és analitzar un cop és sabut si el flux és laminar o turbulent i coneguts varis paràmetres associats a les característiques del fluid en aquell punt ( $\rho$ ,  $\mu$ ,  $C_p$ ,  $k$ ,  $Pr$ ...) el número de Nusselt que li pertoca al punt d'estudi.

Si és laminar: El Nusselt es calcula amb el número de Graetz ( $Gz_D$ , obtingut a l'Eq. 5.7) a partir de l'Eq. 5.8. En cas que sigui un flux laminar totalment desenvolupat el valor és directament 3,66 (x és la posició relativa del fluid al tub).

$$Gz_D = \left(\frac{D}{x}\right) \cdot Re_D \cdot Pr \quad (\text{Eq. 5.7})$$

$$\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668 \cdot Gz_D}{1 + 0,04 \cdot Gz_D^{2/3}} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Si és turbulent: El número de Nusselt es calcula seguint l'Eq. 5.9. Si la superfície està transmetin calor al fluid tèrmic la constant  $n$  serà igual a 0,3 ( $n = 0,3$ ). Si en canvi el fluid es refreda la constant  $n$  serà igual a 0,4 ( $n = 0,4$ ).

$$\overline{Nu}_D = 0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^n \quad (\text{Eq. 5.9})$$

Conegut el nombre de Nusselt, es cerca el coeficient de transferència de calor per convecció mitjà per unitat d'àrea, que sol és sempre el paràmetre a trobar vist que descriu quanta energia per segon es pot transmetre a l'aigua per unitat d'àrea en funció de l'increment de temperatura entre la superfície

del tub i la del fluid;  $\bar{h}$  (W/(m<sup>2</sup>·K)). L'Eq. 5.10 mostra com es relaciona el Nusselt amb la conductivitat tèrmica de l'aigua en aquell punt i el diàmetre del tub. En quant al flux de calor per unitat ( $q_s''$  (W/m<sup>2</sup>)) d'àrea es troba mitjançant l'Eq. 5.11. En l'expressió anterior les temperatures corresponen a la del fluid ( $T_m$ ) i a la de la superfície del tub ( $T_s$ ).

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h} \cdot D}{k} \quad (\text{Eq. 5.10})$$

$$q_s'' = \bar{h} \cdot (T_s - T_m) \quad (\text{Eq. 5.11})$$

Per últim, es pot valorar l'increment de temperatura en un segment concret, el que li entra una aigua a temperatura ( $T_{in}$ ) a la secció del tub d'entrada el segment i li surt per la secció de sortida tenint en compte l'escalfament generat per la convecció de l'aigua la temperatura ( $T_{out}$ ). A continuació es mostra primer el desenvolupament d'on s'obté l'Eq. 5.12 i posteriorment la pròpia equació. Cal considerar que el segment té una temperatura de superfície del tub constant. El perímetre ( $P$ ) serà una nova magnitud a considerar que no s'ha introduït en equacions anteriors.

Desenvolupament de l'expressió:

$$\begin{aligned} \frac{dT_m}{dx} &= -\frac{d(\Delta T)}{dx} = \frac{P \cdot L}{\dot{m} \cdot Cp} \cdot h \cdot \Delta T \rightarrow \int_{\Delta T_{in}}^{\Delta T_{out}} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{P}{\dot{m} \cdot Cp} \int_0^L h \, dx \rightarrow \\ \rightarrow \ln \frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} &= \frac{P \cdot L}{\dot{m} \cdot Cp} \left( \frac{1}{L} \int_0^L h \, dx \right) = -\frac{P \cdot L}{\dot{m} \cdot Cp} \cdot \bar{h} \end{aligned}$$

A continuació es mostra l'Eq. 5.12:

$$\Delta T_{out} = \Delta T_{in} \cdot e^{\left(-\frac{P \cdot L}{\dot{m} \cdot Cp} \bar{h}\right)} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

Aquest ha sigut només un anàlisi teòric dels conceptes que incorpora el propi programa COMSOL Multiphysics® amb algunes fórmules bàsiques referents a la convecció. Cal entendre, com ja s'ha dit anteriorment, que hi ha moltes més consideracions al programa i per això els resultats seran molt més precisos.

#### Definició de les condicions de l'entorn en la primera simulació:

A la primera simulació que es va realitzar es plantejà:

- Un focus de calor de 600 °C a 1000 m de profunditat, corresponent a la temperatura de la cambra magmàtica

- Un focus de calor de 15 °C a la superfície (0m), corresponent a la temperatura mitja a Espanya com s'ha vist en apartats anteriors.
- La resta de propietats bàsiques que es veuen a la **Taula 5.4**.
- Pressió de l'aigua de l'interior del tub igual a 150 bar (perquè estigui en estat líquid i no calgui construir un tub de diàmetre molt més ample per una mateixa temperatura).
- Diferents velocitats del fluid a analitzar, des de 0,1 m/s a 1 m/s.

Els resultats no van ser significatius, vist que l'increment de temperatura pel tub en U en la part de baixada no superava els 5 °C. Semblaria que els resultats són difícils d'explicar, però no ho són. El diàmetre del tub és massa gran i per tant la quantitat d'aigua que cal escalfar també. La conductivitat tèrmica del terreny és massa baixa, i a la conducció des de la cambra magmàtica no li dóna temps a l'energia que hauria d'extreure el tub per escalfar l'aigua els 80 °C que es desitja escalfar. Per això el diàmetre de 60 cm va ser el primer paràmetre que es va canviar de cara a les simulacions definitives. D'aquesta forma, la secció es redueix de manera quadràtica i així també el cabal màssic d'aigua que passa per cada tub (veure l'Eq. 5.13 que relaciona la densitat de l'aigua  $\rho_{aigua}$ , la velocitat a la que flueix  $v_{aigua}$ , i el cabal màssic amb la secció que depèn del diàmetre del tub). La secció del tub com i la velocitat a la que circula l'aigua defineixen també el caudal volumètric  $\dot{V}$  (m<sup>3</sup>/s).

$$\dot{m} = \rho_{aigua} \cdot v_{aigua} \cdot \frac{\pi}{4} D^2 = \rho_{aigua} \cdot \dot{V} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

A continuació es mostren els resultats bons de la simulació i quins paràmetres (per exemple els referents als diàmetres dels tubs de captació) s'han acabat implementant a la simulació.

#### 5.1.2.2. Simulacions finals amb COMSOL Multiphysics®

Com s'ha esmentat en l'apartat d'introducció al model (5.1.2.1), dels paràmetres bàsics definits a la **Taula 5.2** n'hi ha un que varia; i és precisament el del diàmetre de la canonada. En la primera simulació que es va realitzar l'increment de temperatures que derivava de l'estudi de la part de baixada del tub de captació era massa petit, a l'haver d'escalfar un cabal màssic massa gran d'aigua que augmenta en proporció quadrada al diàmetre del tub (Eq. 5.13). Per aquest motiu el següent estudi s'ha realitzat amb un diàmetre de 10 cm en comptes dels 60 cm estudiats inicialment.

Es mostren dues simulacions per veure'n els canvis en funció de la velocitat a la que l'aigua de captació circula pel tub:

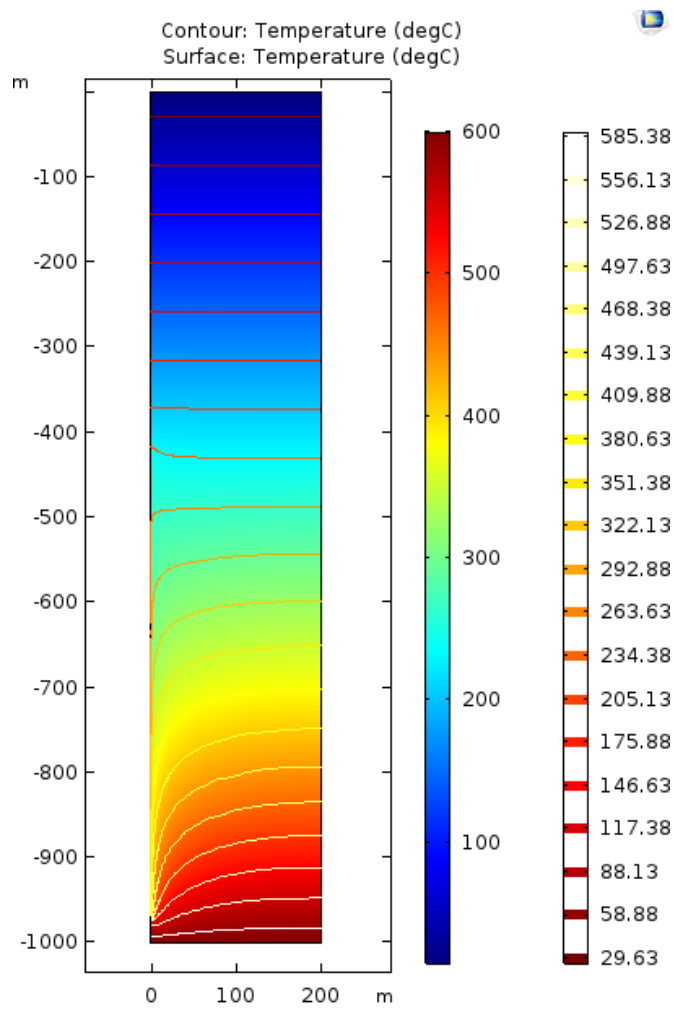
- L'aigua de captació circula pel tub de 10 cm de diàmetre a una velocitat de 0,1 m/s.
- L'aigua de captació circula pel tub de 10 cm de diàmetre a una velocitat de 0,05 m/s.

#### Cas 1: L'aigua de captació circula a 0,1 m/s:



Mantenint tots els altres paràmetres de l'aigua de captació, del tub en U i de la base rocosa; els resultats obtinguts són força interessants. Per una velocitat de l'aigua de 0,1 m/s la temperatura assolida a la part més profunda del tub a 970 m, al final dels 547 m de baixada associats a la zona de captació del tub en U, és igual a 304 °C.

En quant al perfil de temperatures que es descriu en el subsòl, considerat inicialment com capes d'igual temperatura segons la profunditat; ara les pròpies capes es veuen afectades per la presència del tub de captació emprat en la simulació. El resultat de la incorporació de la part de baixada del tub a COMSOL Multiphysics® (seguint la forma d'implementar-lo com s'havia vist a la Figura 5.8) és una davallada de la temperatura de la base rocosa a mesura que aquesta roca s'apropa al tub. Això és degut a l'extracció de calor duta a terme per l'aigua. La Figura 5.9 mostra com és aquest perfil de temperatures en funció de la profunditat un cop s'ha realitzat la simulació amb el tub de baixada de radi 0,05 m (diàmetre 10 cm) i aigua circulant a 0,1 m/s per aquest.

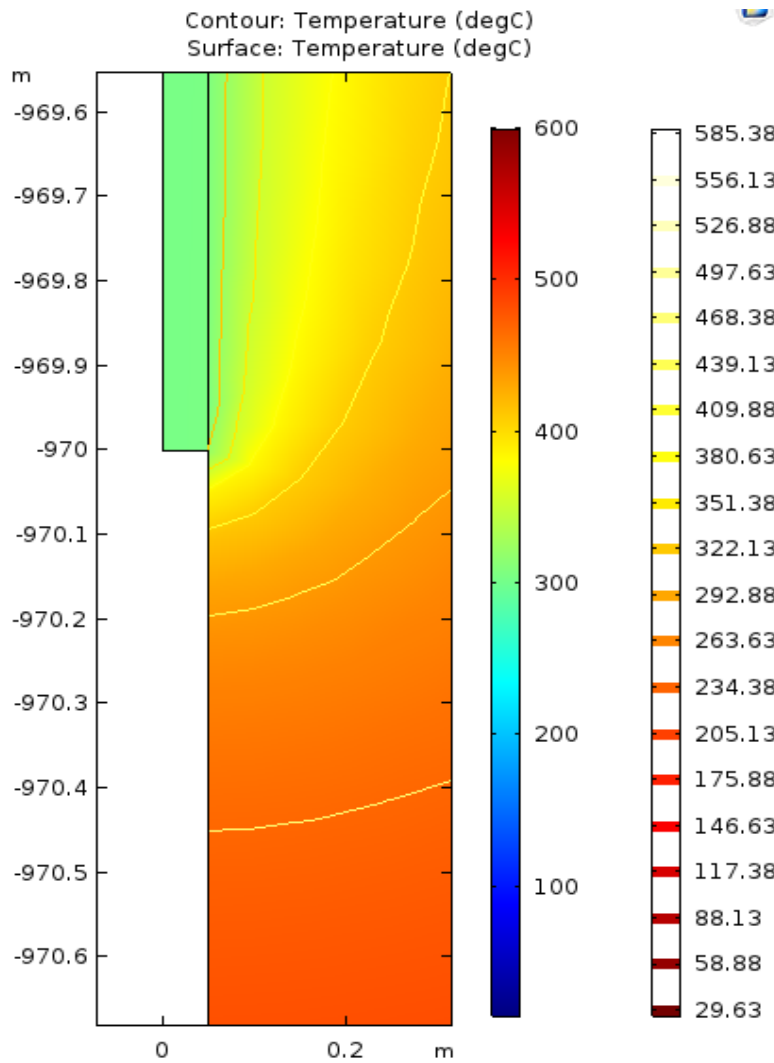


**Figura 5.9.** Perfil de temperatures obtingut amb la simulació amb COMSOL Multiphysics® pel tub de baixada amb radi de 5 cm i aigua circulant a 0,1 m/s. (Font: Pròpia).

La Figura 5.9 és realment interessant de cara a l'estudi de la transferència de calor realitzada en els diferents processos de captació energètica. Fins els 400 m de profunditat la variació de temperatura de la roca a mesura que es va apropant al tub (s'estudia des d'on s'ubica aquest fins 200 m d'aquesta posició) és nul·la o negligible. Això es deu a que el tub està aïllat amb la consideració d'aïllament perfecte i no interacciona amb el terreny, per molt que l'aigua de dintre del tub estigui més calenta que la roca en contacte amb aquest fins els 423 m. Un cop el tub deixa d'estar aïllat i s'entra el la zona de captació, les corbes de temperatura varien segons la distància a la que els punts d'estudi emplaçats a una mateixa profunditat es trobin del tub. En altres paraules, el canvi de temperatura ja no estarà provocat únicament per una dependència amb la profunditat (o l'eix  $y$ ) sinó que ara també hi ha un canvi en funció de la posició en l'eix d'abscisses (o eix  $x$ ).

Per complementar aquest estudi de la variació d'una mateixa profunditat en funció de la posició relativa al tub, s'han implementat a la Figura 5.9 isoterms a diferents temperatures (seguint el codi de colors exposat a la columna de la dreta de tot de la figura esmentada). D'aquesta forma es pot veure com, per exemple, la temperatura de 175,88 °C es troba a 175 m independentment de a quina distància estigui del tub. Ara bé, si s'analitza la corba de temperatura de la isoterma corresponent als 380,63 °C es veu com aquesta cau dràsticament en profunditat a mesura que ens apropem al tub.

Això significa que a 700 m de profunditat i a més de 200 m del tub la temperatura de la roca és d'aproximadament 380 °C, però a una distància de 20 m del tub aquesta temperatura és menor (d'aproximadament 320 °C). A mesura que més energia ha captat l'aigua i més es baixa en profunditat, més dràstica és també la diferència de temperatura per una mateixa profunditat d'estudi. La Figura 5.10 mostra com es restitueixen les temperatures a la zona més profunda de la part de baixada del tub en U.



**Figura 5.10.** Perfil de temperatures a la part més profunda del tub i detallat pels primers 0,35 m de roca, obtingut amb la simulació amb COMSOL Multiphysics® pel tub de baixada amb radi de 5 cm i aigua circulant a 0,1 m/s. (Font: Pròpia).

Com es pot veure a la Figura 5.10, el refredament de la roca que deriva de l'escalfament de l'aigua que circula per l'interior del tub implica que la roca en els primers 10 cm que envolten en aquest no superi els 300 °C (de fet la isoterma corresponent a 292,88 °C es pot apreciar que acaba al final del tub). Tanmateix, en menys de 0,45 metres per sota del tub la roca augmenta de 292,88 °C a 409,88 °C. Això es deu a que aquestes grans afectacions de la temperatura únicament es donen als punts més propers al tub, ja que aquest refreda la roca que al mateix temps que un flux de calor provinent de la cambra magmàtica l'escalfa. De fet, a la profunditat on s'està realitzant l'estudi de la Figura 5.10 la temperatura de la roca en condicions normals (sense la presència del tub) seria de 582,45 °C.



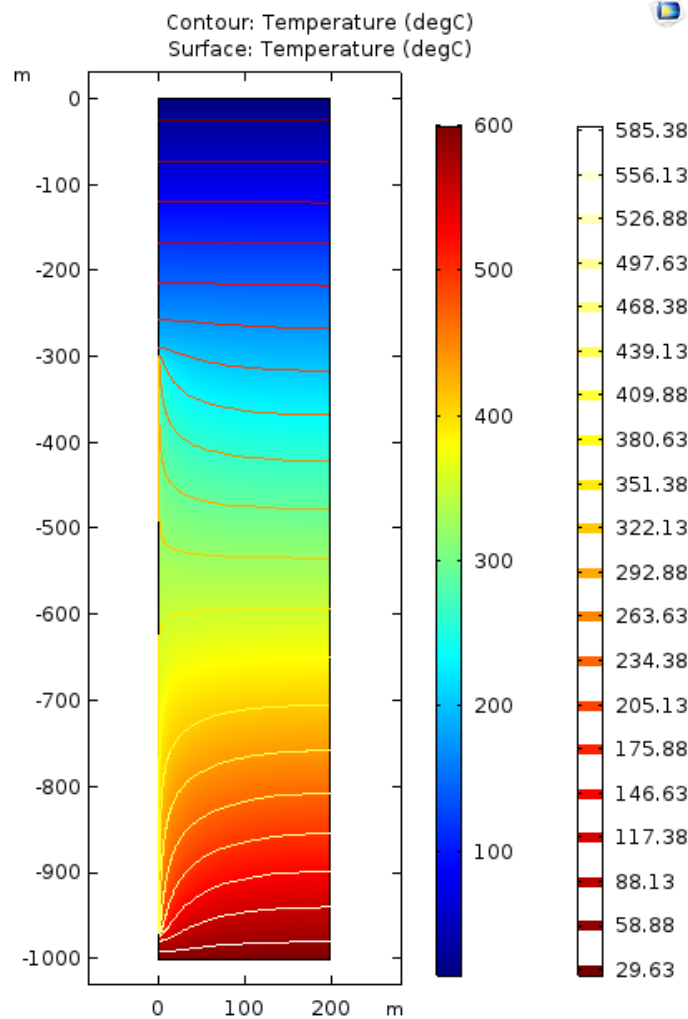
En quant la temperatura de l'aigua de captació, el programa COMSOL Multiphysics® permet calcular el seu valor de forma molt precisa a mesura que va baixant pel tub. El resultat que interessa veure és la temperatura final en el seu pas per la part de baixada del tub en U. D'estar inicialment a 260 °C, l'aigua s'ha escalfat a 304 °C (un increment de 44 °C). Aplicant l'Eq. 5.13 per trobar el cabal màssic (realment el programa ho calcula automàticament, però s'hauria de fer d'aquesta forma so es desitjés fer manualment) s'obté un cabal màssic de 0,7854 kg/s circulant per cada tub, i tenint en compte l'energia captada per dur a terme l'increment de temperatures anteriors ens dona un resultat de potència captada en aquesta part de baixada del tub en U igual a 177,77 kW (increment d'entalpies entre l'entrada a la zona de captació i el punt final a 970 m pel cabal màssic de l'aigua).

A la simulació no s'ha introduït la corba que uneix la part de pujada i la part de baixada del tub en U, vist que hagués requerit la definició d'un entorn tridimensional i l'assumpció realitzada on es mesura el perfil de temperatures d'un únic pla de l'espai que uneix el centre del tub amb un punt qualsevol del seu perímetre, tampoc hagués sigut possible. Això complicaria molt la simulació, i no es considera necessari per una secció del tub de captació tant petita que ni es notaria a l'increment de temperatura que suposaria a l'aigua del cicle primari.

Així, a continuació cal veure com afecta a la temperatura de l'aigua i a la roca mare de l'entorn simulat l'extracció energètica duta a terme en la zona no aïllada de la part de pujada del tub U. En aquesta simulació es partia que no es coneixia quina havia de ser la longitud de captació necessària perquè l'aigua s'escalfés fins a 340 °C. En cas de que no s'arribés a aquesta temperatura un cop observats els resultats de la simulació, significaria que la temperatura màxima de l'aigua en aquest tram no arriba als 340 °C abans que la temperatura del terreny assoleixi aquest valor.

Cap destacar que, quan les isoterms de temperatura comencin a pujar cap a dalt de forma que per una mateixa profunditat augmenta la temperatura a l'apropar-se al tub; significarà que el tub està escalfant la roca i caldria aïllar aquella zona perquè no es perdi temperatura a l'aigua de captació en la seva fase final d pujada pel tub en U.

La Figura 5.11 mostra els resultats del perfil de temperatures del terreny i la temperatura de l'aigua de captació en cada punt per la part de pujada del tub en U amb la velocitat de l'aigua de 0,1 m/s.



**Figura 5.11.** Perfil de temperatures obtingut amb la simulació amb COMSOL Multiphysics® pel tub de pujada amb radi de 5 cm i aigua circulant a 0,1 m/s. (Font: Pròpia).

Els resultats obtinguts d'aquesta simulació (amb una temperatura inicial de l'aigua a la part més baixa del tub igual a 304 °C degut a l'increment existent a la baixada) costen de precisar mirant la Figura 5.11 . Malgrat això, a continuació estan explicats i la figura és un bon suport per valorar els resultats.

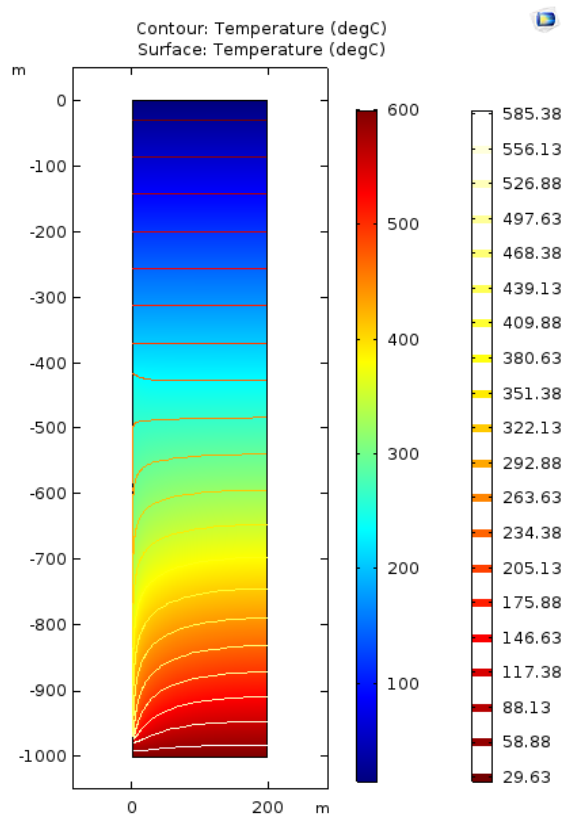
Com es pot veure les corbes de temperatura comencen a pujar en profunditat a partir d'aproximadament els 600 m sota la superfície. Doncs bé, això és degut a que s'assoleix una temperatura màxima de 339 °C a una profunditat de 650 m, on la roca propera al tub també està a la mateixa temperatura. A partir d'aquesta profunditat, l'aigua ja no s'escalfa més i passa a cedir energia al terreny en comptes de captar-ne. Per tant, no s'assoleixen els 340 °C per només 1 °C per una velocitat de l'aigua de captació per cada tub de 0,1 m/s. Tot i això, els resultats es consideren vàlids i satisfactoris ja que permeten complir els objectius desitjats en quan a la captació energètica es refereix. Per tant la zona de captació és de 320 m a la pujada del tub en U. La potència de captació

a la pujada és de 176,03 kW; donant una potència de captació total del tub amb l'aigua a 0,1 m/s igual a 353,8 kW al sumar-li els captats en la baixada.

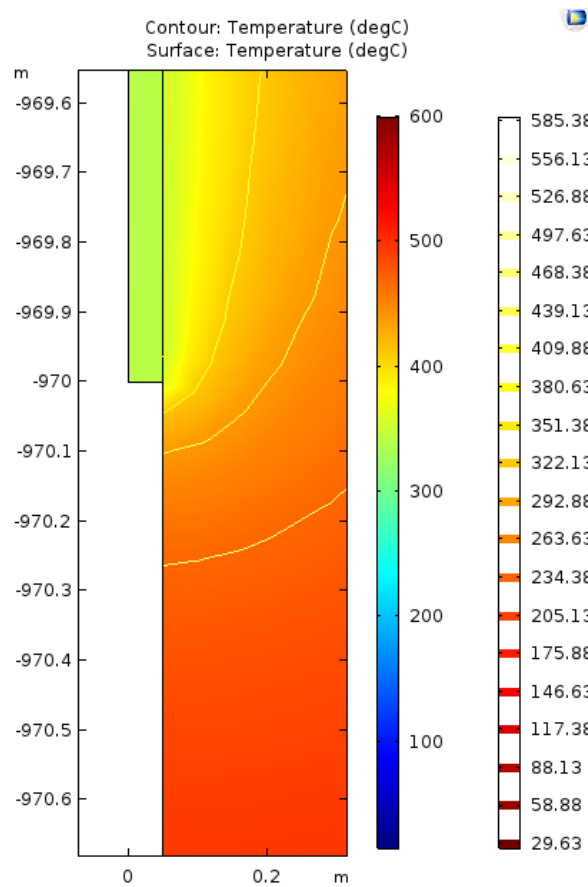
En quant a les isotermes de la Figura 5.11 que per profunditats menors a 600 m comencen a pujar escalfant la base rocosa a mesura que ens apropem al tub, s'eliminaran a l'aïllar els 650 m de tub que resten fins la superfície. D'aquesta forma, al bescanviador entre els cicles primari i secundari li arriba un cabal màssic d'aigua corresponent a la suma dels cabals màssics de cada pou que s'instal·li (si la velocitat és 0,1 m/s, el cabal per un radi de tub de 5 cm és 0,7854 kg/s). A la part "Grup de captació" dintre de l'estudi del "Disseny de la central" (5.2.1) es veu quants pous calen per arribar a generar aproximadament 50 MW elèctrics a la sortida de la central.

#### Cas 2: L'aigua de captació circula a 0,05 m/s:

Repetint les simulacions anteriors pel mateix tub de captació de 10 cm de diàmetre i les mateixes condicions de l'entorn simulat anteriorment amb l'únic canvi de reduir la velocitat de l'aigua que circula pels tubs a 0,05 m/s, s'obté la Figura 5.12 i la Figura 5.13.



**Figura 5.12.** Perfil de temperatures obtingut amb la simulació amb COMSOL Multiphysics® pel tub de baixada amb radi de 5 cm i aigua circulant a 0,05 m/s. (Font: Pròpia).



**Figura 5.13.** Perfil de temperatures a la part més profunda del tub i detallat pels primers 0,35 m de roca, obtingut amb la simulació amb COMSOL Multiphysics® pel tub de baixada amb radi de 5 cm i aigua circulant a 0,05 m/s. (Font: Pròpia).

Com es pot apreciar a la Figura 5.12 sembla aparentment bastant semblant al de la Figura 5.9. Tanmateix, els resultats de l'escalfament de l'aigua són molt diferents. Es pot veure més clarament aquest fet a la Figura 5.13; on es veu com en comparació a l'estudi realitzat per l'aigua circulant a 0,1 m/s aquesta està a més temperatura seguint l'escala de colors marcada a la llegenda d'ambdues figures. De fet, analitzant els resultats al COMSOL Multiphysics®, que dona els valors en tots els punts, s'obté que a 970 m de profunditat (i per tant al final del tub) l'aigua es troba a una temperatura de 340 °C.

La simulació es va realitzar tenint en compte que no hi havia canvi de fase de l'aigua al llarg del seu escalfament pel tub. Tanmateix, la temperatura de saturació de l'aigua a 150 bar és de 342,16 °C. Es va simular també la part de pujada obtenint una temperatura màxima de l'aigua a 0,05 m/s igual a 392 °C. De totes formes, el resultat correspon a un cas irreal on l'aigua es segueix escalfant un cop

superada la seva temperatura de saturació en estat líquid. Per tant, d'aquest estudi no es pot extreure cap conclusió a part que hi hauria un canvi de fase seguint aquest model i tenir present que el calor latent no arribaria a 392 °C.

Conseqüentment, mostrar el perfil de temperatures de la roca en contacte amb el tub en U a la part de pujada d'aquest no té sentit, perquè és irreal. De totes formes la part de baixada si que es pot analitzar, la potència captada en aquesta part baixada del tub a 0,05 m/s (cabal màssic de 0,3927 kg/s) és de 180,03 kW. Aquest valor és semblant al que s'obtenia a la baixada del tub en U amb aigua circulant a 0,1 m/s. Tanmateix, com s'ha esmentat múltiples vegades al llarg d'aquest projecte, la captació es realitza únicament amb aigua en estat de líquid refredat per evitar tenir que fer perforacions massa grans per introduir tubs de gran diàmetre que permetin el pas d'aigua en estat de vapor. Per tant, a l'hora de fer les comparacions entre les dues simulacions realitzades, només es tindran en compte els resultats per la simulació amb l'aigua de captació circulant a 0,1 m/s.

#### Comparació de resultats:

Sabent que es vol tenir una potència instal·lada d'aproximadament 50 MW (s'ha dimensionat per produir 49,35 MW al considerar els rendiments dels generadors elèctrics), serà necessari captar una potència mitjançant el grup de captació equivalent a 160,625 MW (càlculs obtinguts a la fulla d'Excel i justificats a l'apartat del grup de captació al títol "Disseny de la central"). Tenint en compte les potències de captació associades a les simulacions amb COMSOL Multiphysics® per ambdues velocitats de l'aigua de captació comentades anteriorment, el número de pous necessaris són:

- Per 0,1 m/s: La potència de captació de cada tub en U o pou és de 353,8 kW. Es necessiten captar 160,625 MW entre tots els pous per aportar al cicle de Rankine l'energia necessària per produir 49,35 MW. Amb un increment de 260 °C a 339 °C pel pas en cada tub i la potència associada de 353,8 kW a aquest increment pel cabal màssic de 0,7854 kg/s, es requeriran 453,83 pous. Al poder ser únicament un valor enter, 454 tubs en U. La distància mínima entre pous, veient el perfil de temperatures obtingut en la simulació, és de 100 m aproximadament. D'aquesta forma cada pou agafaria una hectàrea de terreny (100 m x 100 m). Es considera oportú indicar que s'hauria de valorar amb més detall si els tubs en U es poden posar més propers entre ells quan es particularitzés l'estudi per un cas concret.
- Per 0,05 m/s: Els resultats no són vàlids a l'haver-se fet una simulació considerant que l'aigua no canviava en cap cas d'estat, el programa no modelitza el canvi de fase.

Un diàmetre de tub de 10 cm no podrà aguantar les pressions generades per l'aigua un cop aquesta canvia d'estat i es transforma en vapor sobreescalfat. És imprescindible, com ja s'ha comentat anteriorment i de forma repetida al llarg del projecte, que l'aigua de captació es mantingui en estat

de líquid refredat (d'aquesta manera es poden introduir tubs de diàmetres petits i de perforació més senzilla).

Si es volgués una circulació de l'aigua a 0,05 m/s (cas 2); es podria aïllar tota la part de pujada del tub en U mantenint-la a 340 °C i per sota dels 342,16 °C corresponents a la temperatura de saturació de l'aigua a 150 bar. Tanmateix, això suposaria una pèrdua energètica respecte a l'estudi de 0,1 m/s ja que el cabal màssic es redueix a la meitat i només es podrien captar els 180,03 kW associats a la baixada. Es requeririen així 893 pous per tenir la mateixa potència captada que en el cas 1 es capten amb 454 pous.

Per això el cas 1 és més favorable, es simulava amb les consideracions optimitzades per aprofitar de forma òptima la transferència de calor entre la cambra magmàtica i la roca mare per sobre d'aquesta. S'empren els resultats associats al cas de velocitat de circulació de l'aigua a 0,1 m/s per dur a terme el disseny de la central. A la **Taula 5.3** es veuen els resultats més significatius de la simulació amb el software tractat al llarg d'aquest procés de modelització del sistema de captació energètica. La longitud de captació total surt de la suma dels 320 m de pujada i dels 547 m de baixada no aïllats, donant un total de 867 m.

Paràmetres òptims obtinguts amb la simulació amb COMSOL Multiphysics®	
Diàmetre de cada tub en U (cm)	10 cm
Longitud total de captació per cada tub en U (m)	867 m
Longitud total aïllada per cada tub en U (m)	1073 m
Velocitat de circulació de l'aigua òptima (m/s)	0,1 m/s
Cabal màssic de l'aigua en un tub en U (kg/s)	0,7854 kg/s
Temperatura de sortida de cada tub en U (°C)	339 °C
Separació mínima recomanable entre pous (m)	100 m
Potència extreta de cada pou (kW)	353,8 kW
Nº de pous necessaris per produir 49,35 MW el.	454 pous
Cabal màssic total del circuit primari (kg/s)	356,5716 kg/s

**Taula 5.3.** Paràmetres òptims del model de captació definit amb COMSOL Multiphysics®. (Font: Pròpia).

## 5.2. Disseny de la central

Com ja s'ha esmentat en diverses ocasions anteriorment, aquest treball es basa en l'estudi del funcionament i disseny, instal·lació i implementació d'una central volcànica. Tanmateix, no convindria confondre aquesta última part amb una descripció minuciosa de cada component de la central (caldria entrar a valorar com afecta cada operació realitzada a la central i la producció continuada d'energia a cada singular component d'aquesta; per exemple a les turbines, al grup de bombeig, canonades, bescanviadors de calor, grup d'alternadors síncrons i molts altres). Tot aquest estudi podria ser perfectament temari suficient per cobrir un TFG sencer sobre el manteniment d'una central de producció d'energia elèctrica, o la resposta d'una turbina a les forces de tracció aplicades a les seves pales quan aquestes reben una gran energia mecànica promoguda per aigua sobreescalfada, o molts altres. En altres paraules, el projecte que ens ocupa tractarà aquests aspectes de instal·lació i disseny de la central volcànica des d'un punt de vista global que permeti transmetre els punts claus en la captació i en la transformació de l'energia i els components que tenen un impacte directe en aquestes.

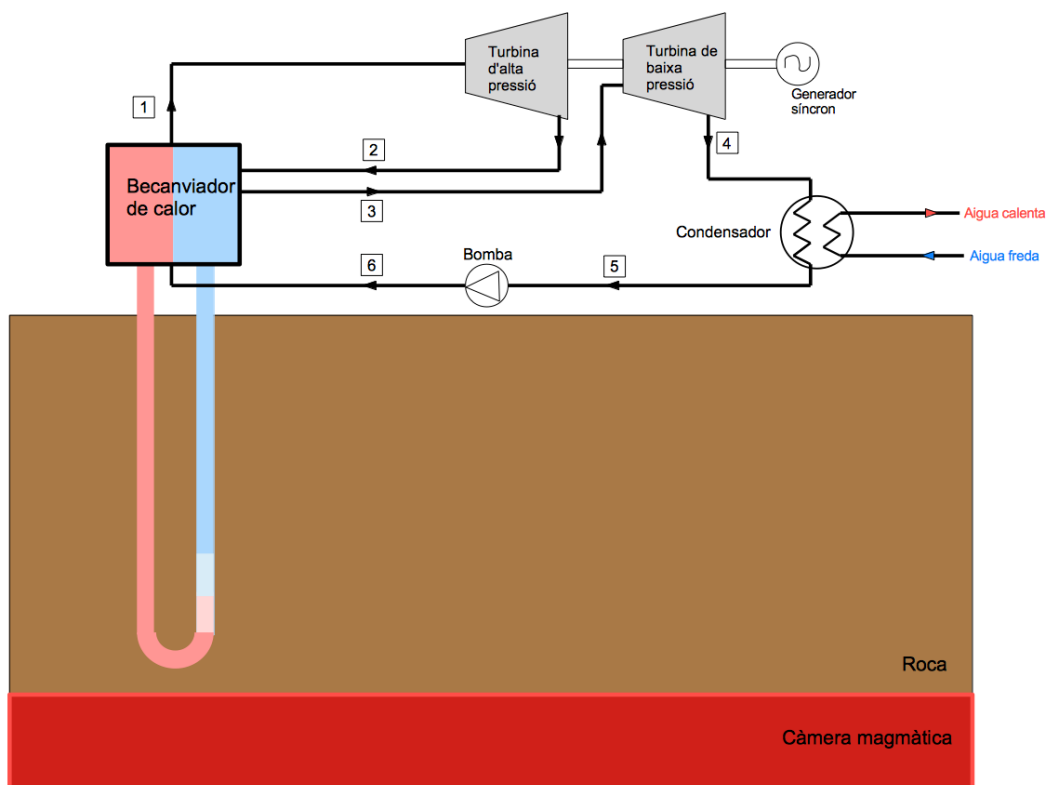
Per aquest precís motiu, és necessari inicialment identificar els grans grups de manipulació d'energia que requereix una central que extreu energia de la roca calenta en contacte amb una cambra magmàtica. Un cop obtinguts els paràmetres bàsics de la central i identificat dintre d'aquests grups els components més importants, ja es pot entrar més en detall amb l'estudi de components específics. Com a punt de partida pel disseny de la central, els tres grans grups de manipulació d'energia són:

- ❖ El grup de captació: Com el seu nom indica, seran els components destinats a extreure l'energia que alimentarà la central. Aquests components seran les canonades del grup de captació (ja siguin els tubs en U com les canonades on s'ajunta i es transporta l'aigua cap al bescanviador, i, després del pas per aquest, cap als tubs en U de nou).
- ❖ El grup de transformació a energia mecànica: Està compost pel material destinat a la conversió de l'aigua sobreescalfada durant el seu pas pels components del grup de captació per obtenir energia mecànica. Aquest material inclou el bescanviador que actua com a generador de vapor amb l'aigua de captació com a font d'energia i tots els components del cicle de Rankine que tracten l'aigua d'un cicle diferent al primer que té com a objectiu moure les turbines per obtenir energia mecànica de rotació.
- ❖ El grup de transformació a energia elèctrica: El formen els diferents components que manipulen o treballen amb electricitat. El primer de tots és el generador síncron que transforma l'energia mecànica de rotació provinent del grup de turbines en electricitat,

seguit de tots els posteriors convertidors, transformadors i reguladors elèctrics (entre d'altres) que permetran adequar l'electricitat produïda a la central per fer-la subministrable a la xarxa elèctrica.

Tenint en compte que el gran pes del TFG realitzat fins ara s'ha basat precisament en la part corresponent al grup de captació d'energia (vist que òbviament és la part que requereix més estudi per assolir els coneixements requerits per fer possible una central volcànica, alhora que la més diferenciable respecte altres centrals energètiques), es faran múltiples referències als estudis realitzats anteriorment, esmentant quins components poden complir les funcions especificades en els estudis inicials. Aquest material i com s'hauria d'instal·lar en un entorn real ja s'ha anat veient al llarg de tot el projecte.

La Figura 5.14 mostra un esquema senzill de la central plantejada i com seria un cicle de Rankine bàsic de 5 etapes que permetés produir aquesta energia.



**Figura 5.14.** Esquema bàsic de la central i del cicle de Rankine. (Font: Pròpia).

Com és d'esperar, la Figura 5.14 no està a escala, simplement és un esbós del disseny bàsic de la central. El grup de captació que s'observa és només el d'un sol tub en U, però com s'ha comentat en apartats anteriors es troben en paral·lel més tubs com aquests separats a la distància que l'entorn

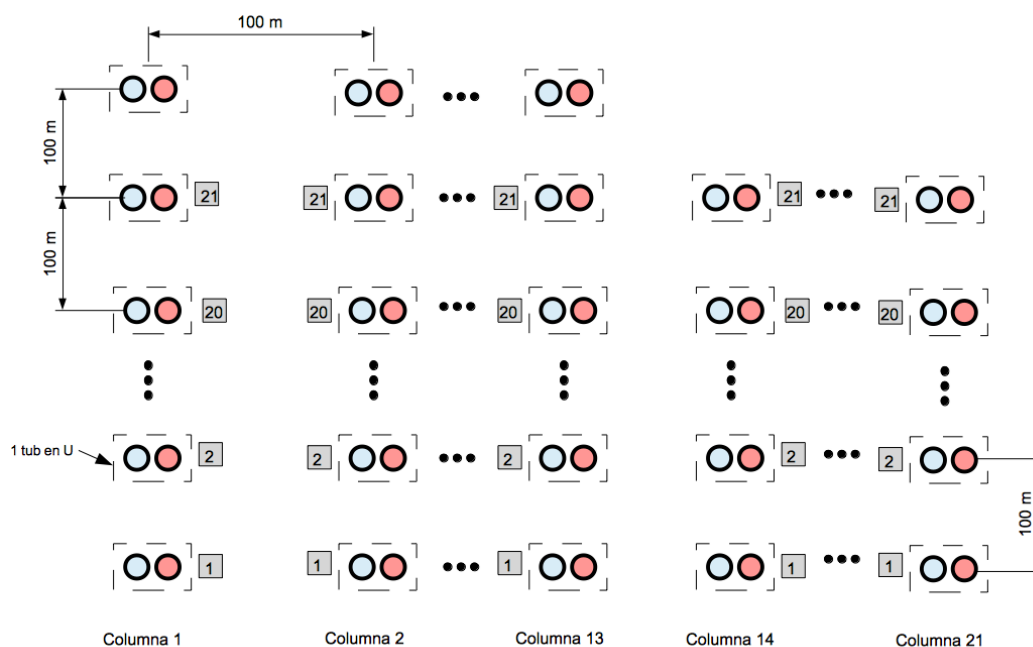


estudiat ho permet. Tot el cabal d'aigua escalfada i a alta pressió, en el seu punt de màxima entalpia, passarà pel bescanviador de calor que mitjançant una transferència de calor transmet l'energia que alimenta el cicle de Rankine. D'aquesta forma el bescanviador de calor és el component en comú entre el grup de captació i el de transformació de l'energia capada en energia mecànica.

### 5.2.1. Grup de captació

Les característiques del grup de captació venen definides segons els resultats de la simulació realitzada amb COMSOL Multiphysics® i els corresponents càlculs amb Excel. La **Taula 5.3** mostrava precisament quins eren els resultats més importants d'aquest estudi. Amb 454 pous es podria captar un total de 160,625 MW traduïts en un increment de temperatura de 79 °C en els 356,5716 kg/s d'aigua que es distribueixen en els diferents tubs en U i s'ajunten abans d'entrar al bescanviador.

Per poder dur a terme aquesta captació, caldrà situar els 454 pous deixant el mínim de distància entre ells perquè la pròpia cambra magmàtica retorni a la base rocosa l'energia que els pous n'estan extraient. Aquesta distància descrita a la **Taula 5.3** com 100 m, es va determinar segons els resultats de l'evolució de la temperatura en funció de la profunditat i la proximitat al tub de la Figura 5.9 i Figura 5.11. La distribució més lògica seria la d'una quadrícula de 21x21 pous separats 100 m entre ells, és a dir, 21 files de pous paral·lels amb 21 pous per cada fila, amb una fila extra de 13 pous per arribar als 454 tubs en U. La Figura 5.15 mostra un esquema d'aquesta disposició plantejada.



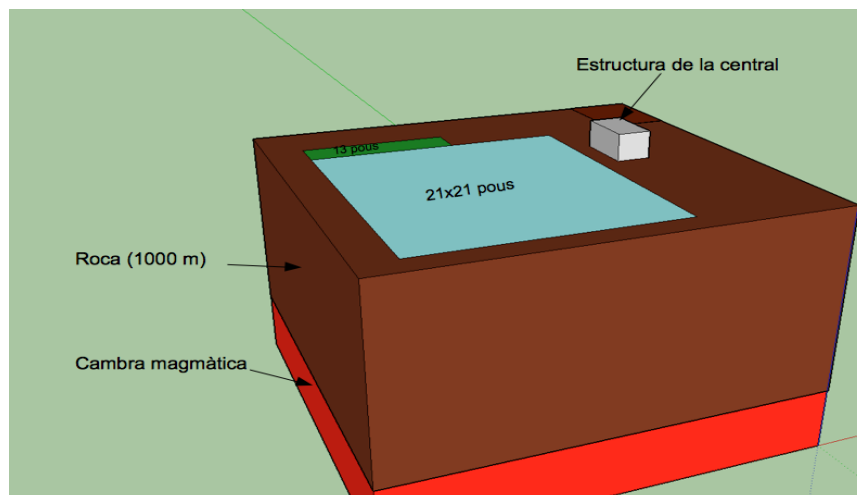
**Figura 5.15.** Esquema d'una possible distribució dels 454 tubs en U. (Font: Pròpia).

Un cop es situen els 454 pous seguint l'esquema de la Figura 5.15 (que no està a escala ni mostra la totalitat dels tubs, ja que el diàmetre d'aquests de 10 cm és impossible de visualitzar davant els 100 m de separació entre tubs) els cabals màssic de sortida de tots ells s'ajunten en el cabal màssic de 356,5716 kg/s i passen pel bescanviador entre el cicle primari de captació i el secundari de Rankine. A la sortida del bescanviador, un cop s'ha refredat el fluid, es tornen a separar passant pels diferents tubs en U.

El problema, evident, que deriva de la distància mínima que s'ha decidit deixar entre pous és que d'un extrem a un altre del quadrat de 21x21 tubs en U és que d'una punta a una altre hi ha 2100 m. De fet en les 13 primeres columnes n'hi ha 2200 m de màxima separació entre pous d'una mateixa columna. Es calcula la superfície total a cobrir fent una quadrat de 2,1 km x 2,1 km i un rectangle petit format per 13 quadrats de 100 m x 100 m (que són els tubs en U que no s'han pogut disposar en el quadrat gran i que calien per arribar als 454 tubs). L'àrea de terreny que ocupa aquesta instal·lació és de 4,54 km<sup>2</sup>, en metres de 4540000 m<sup>2</sup>. Si ve és cert que hi ha cambres magmàtiques més grans com la que s'ha vist anteriorment del volcà de Geitafell, al Sud-Est d'Islàndia (43), no és fàcil trobar una cambra d'aquestes dimensions a poca profunditat. La d'aquest volcà es trobava a 2 km. Tanmateix, és qüestió d'analitzar diferents zones volcàniques del planeta i possiblement es trobi un emplaçament idoni que tingui una cambra magmàtica fins i tot més gran a una profunditat accessible amb les tecnologies de perforació que s'han treballat en aquest projecte. De totes maneres, és un aspecte que limita la potència instal·lada que pot arribar a tenir la central segons les dimensions de la cambra magmàtica (en els càlculs d'aquest projecte es va considerar infinita i sempre a la mateixa temperatura en tots els punts).

Aquests són els paràmetres més importants a valorar de la part del grup de captació, ja que tots els altres s'han vist a l'hora de definir la simulació. En aquest apartat es valora el disseny de la central i els càlculs necessaris per dimensionar-la, i en quant a aquest grup, tampoc cal fer cap anàlisi més profund del que ja s'ha realitzat.

La Figura 5.16 mostra com hauria de ser de forma aproximada aquesta distribució de àrees amb una simplificació realitzada amb el programa de representació tridimensional Google SketchUp. En aquesta s'hi poden apreciar dues àrees sobre la superfície analitzada; en blau clar l'àrea del quadrat de 2,1 km x 2,1 km i en verd l'àrea corresponent als 13 pous restant per tenir-ne els 454 desitjats. Clarament la figura no està a escala, però compleix el seu objectiu de mostrar com es situarien aquestes àrees per col·locar els tub en U com s'havien proposat en la distribució de la Figura 5.15.

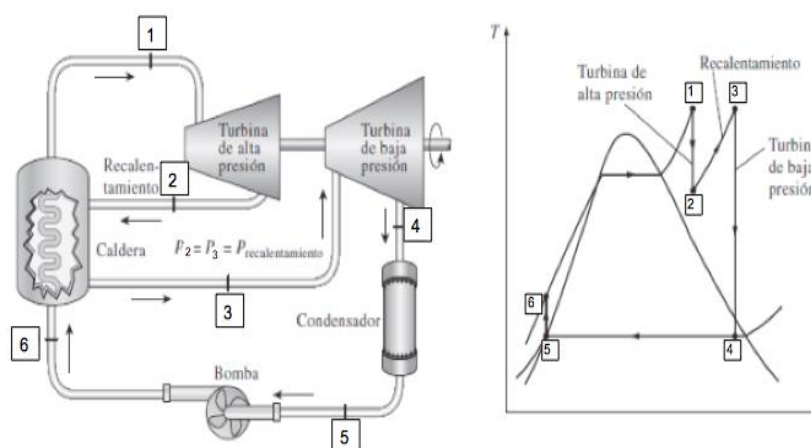


**Figura 5.16.** Esquema simplificat de la distribució de les àrees del camp de captació. (Font: Pròpia).

En el següent apartat s'estudiaran els procediments que cal seguir per transformar l'energia captada pels 454 tubs en U a energia mecànica de rotació en les turbines del cicle de Rankine.

### 5.2.2. Grup de transformació a energia mecànica.

A continuació s'analitzaran els diferents components encarregats d'aprofitar l'energia provinent de l'aigua de captació per acabar obtenint energia mecànica de rotació i posteriorment gràcies a un generador síncron, electricitat. El conjunt d'aquest components actua fent un cicle de Rankine convencional, com el de la majoria de centrals basades en l'escalfament d'aigua per accionar les turbines. Els punts bàsics de l'estat de l'aigua del cicle de Rankine estudiat són 6, que s'aprecien a la Figura 5.17.



**Figura 5.17.** Cicle de Rankine convencional (Font: bp.blogspot.com (48)).

La Figura 5.17 mostra els diferents punts d'un cicle de Rankine convencional alimentat per un bescanviador de calor o una caldera (independentment de quina sigui la font energètica de la central) i els canvis de l'estat de l'aigua apreciats en la corba entropia-temperatura (S-T). Els diferents punt d'un cicle de Rankine convencional com aquest són els següents 6:

1. Just després del generador de vapor en el punt de màxima pressió i temperatura de l'aigua del cicle de Rankine. L'aigua es trobarà en estat de vapor sobreescalfat a la temperatura que permeti la pròpia energia captada pel cabal màssic de treball del cicle i a la pressió aportada per la bomba ubicada entre els punts 5 i 6.
2. Després del pas per la turbina d'alta pressió. Aquesta turbina es caracteritza per aprofitar l'energia de vapor sobreescalfat (no pot tenir partícules líquides, ja que petites gotes d'aigua malmetrien la turbina al llarg dels cicles de treball) per aplicar una força de tracció a les seves pales i transformar l'energia cinètica de l'aigua en energia mecànica de rotació al seu eix. Es redueix considerablement l'entalpia existent al punt 1 degut a l'extracció energètica de la turbina, resultant en aigua a més baixa pressió i temperatura. Depèn de l'energia extreta, l'estat de l'aigua serà de vapor sobreescalfat, vapor saturat o aigua en condicions de saturació; amb un títol de vapor fàcilment calculable.
3. El tercer punt es caracteritza per trobar-se a la mateixa pressió que el punt 2 però a molta més temperatura (amb el conseqüent canvi d'estat en cas que no fos ja aigua en forma de vapor sobreescalfat). Aquesta aportació energètica la dona un segon pas pel generador de vapor entre la sortida de l'aigua de la turbina d'alta pressió, en l'estat que correspongui, i l'entrada de la turbina de baixa pressió. Depèn de la temperatura a la que es trobi el vapor sobreescalfat en aquest tercer punt, pot ser el de màxima entalpia del cicle, sempre i quan no ho sigui en el punt 1 (depenent de quan s'escalfi el vapor en cada pas pel bescanviador).
4. El quart punt correspon a la sortida de la turbina de baixa pressió. Normalment l'aigua sol estar en estat de vapor humit o vapor saturat en aquest moment, a temperatura moderada. En cas d'estar en el primer estat el títol de vapor encara sol ser elevat i per tant és necessària la intervenció d'un condensador que permeti obtenir aigua líquida (com a líquid saturat). En cas que el punt quatre no es trobi l'aigua en condicions de saturació (independentment del títol de vapor) caldria un refredador abans del propi condensador, motiu pel qual sempre es dissenyen les centrals de forma que només calgui el condensador. D'una altra manera, a més, s'estaria desaprofitant energia.
5. El cinquè punt correspon a la sortida del condensador; l'aigua ha d'estar en estat líquid (líquid saturat) per poder pujar-li de nou la pressió en el seu pas per la bomba. Efectivament, les bombes d'aigua requereixen l'entrada d'aigua líquida per funcionar amb rendiments alts,

motiu pel qual s'introdueix el condensador que tant empitjora l'eficiència global del cicle però alhora tant necessari és. També és el punt de mínima entalpia.

6. Per últim, el sisè punt que correspon a l'ubicat a la sortida de la bomba d'aigua que torna a pujar la pressió al seu màxim i a l'entrada del bescanviador de calor que actua com a generador de vapor. Òbviament, al pujar-li la pressió al líquid saturat del punt 5 amb una mínima variació de temperatura; s'obté aigua en estat de líquid refredat. L'entalpia d'aquest punt correspon a la que hi havia al punt cinc més l'aportació que dona la pròpia bomba.

Tenint en compte que s'ha dimensionat la central volcànica per subministrar una potència determinada des del punt de partida, es pot començar dimensionant el cicle de Rankine, establint les pressions de treball i trobant els diferents valors de les entalpies i temperatures a cada punt. Els resultats del cicle, dels què en els següent apartats s'expliquen els càlculs, són els que es poden veure a la **Taula 5.4**.

Punts del cicle					
Punt	Pressió (bar)	Temp. (°C)	h (kJ/kg)	S (kJ/(kgK))	Estat
1	70	319	2914,252	6,061	vap. sobre.
2	10	179,886	2596,037	6,185	vap. humit
3	10	319	3092,267	7,194	vap. sobre.
4	0,1	45,808	2385,095	7,526	vap. humit
5	0,1	45,808	191,812	0,649	líq. saturat
6	70	46,233	199,659	0,652	líq. refredat
Punts isentròpics					
2s	10	179,886	2539,882	6,061	vap. humit
4s	0,1	45,808	2279,425	7,194	vap. humit
6s	70	46,045	198,874	0,649	líq. refredat

**Taula 5.4.** Resultats del cicle de Rankine. (Font: Pròpia).

És important destacar que les pressions de treball de tots els punts i les temperatures després dels dos passos pel generador de vapor (entre els punts del cicle 1 i 6 i entre 2 i 3) s'han de definir en funció de la potència que es vulgui subministrar així com el cabal màssic de l'aigua de cicle. Mitjançant aquests valors, es poden trobar les primeres entalpies dels punts 1 i 3 i a partir d'aquestes tots els altres resultats del cicle de la forma que es veurà a continuació. En quant al cabal màssic, es considera constant en tot el circuit secundari corresponent al cicle de Rankine ja que no es fa cap extracció a les turbines.

A continuació s'analitzen els diferents components del cicle de Rankine i els càlculs de diferents paràmetres que d'aquests en deriven i que permeten finalment omplir la **Taula 5.4** amb els resultats obtinguts.

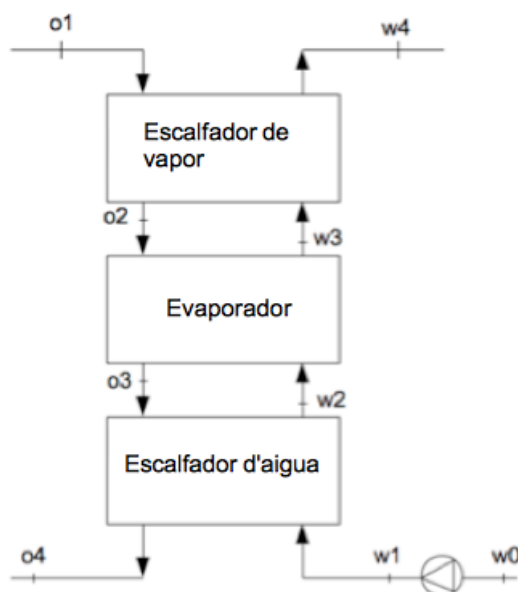
#### 5.2.2.1. El generador de vapor

Hi ha un element del cicle de Rankine que requereix un estudi totalment diferenciat a la resta, ja que té múltiples etapes de transformació de l'estat de l'aigua i ha d'estar dissenyat per permetre aquestes variacions. Afecta tant al grup de captació com al grup de transformació de l'energia captada a energia mecànica de rotació; el generador de vapor.

El bescanviador de calor emprat en una central volcànica com la plantejada ha d'estar distribuït en diferents parts que realitzin processos diferents que posats en sèrie acabaran per permetre la transmissió energètica de l'aigua del cicle de captació a la del cicle de Rankine. El funcionament serà semblant al bescanviador de les central geotèrmiques binàries d'alta potència, amb l'única diferència en la font de calor emprada (dintre que sempre és a partir d'elements del subsòl). Aquests processos o fases suposen quatre bescanviadors independents dintre del bescanvi global, que són:

1. Escalfador d'aigua: Permet escalfar l'aigua que li entra com a líquid refrigerat (després d'haver augmentat considerablement la seva pressió a la bomba) per portar-la fins al punt de líquid saturat, a l'augmentar de forma considerable la seva temperatura sense variar la pressió.
2. Evaporador: En aquesta fase del bescanvi no es varia la temperatura de l'aigua, simplement s'utilitza part de l'energia de l'aigua de captació per passar de líquid saturat a vapor saturat; augmentant de forma considerable la seva entalpia.
3. Escalfador de vapor: Sense variar la pressió, s'augmenta considerablement la temperatura del vapor saturat que surt del evaporador per convertir-lo en vapor sobreescalfat amb alta temperatura i entalpia. Aquesta energia s'emprarà per la primera turbina.

Aquests tres bescanviadors formaran part dels emprats per passar del punt 6 al punt 1 del cicle de Rankine, i com és lògic vista la diferència d'entalpies entre aquests punts, també seran el grup del generador de vapor que requerirà més energia. La Figura 5.18 mostra la seva disposició. Un altre aspecte important a tenir en compte és que estan disposats en sèrie, de forma que el cabal màssic d'aigua de captació que els alimenta és el mateix ( $\dot{m}_{p1}$ ). A més operaran els tres a la mateixa pressió; això es deu a que en tot el procés d'escalfament i evaporació de l'aigua refredada en el punt de partida, no hi ha cap punt d'extracció energètica ni cap bomba que n'augmenti la pressió.



**Figura 5.18.** Fases del generador de vapor entre els punts 6 i 1 del cicle de Rankine. (Font: Pròpia).

Tanmateix, com s'ha vist en la descripció del circuit secundari de l'aigua, aquesta és sotmesa a un reescalfament entre la turbina d'alta pressió i la turbina de baixa pressió per poder implementar precisament aquesta segona turbina i millorar així el rendiment tèrmic del cicle. D'aquesta forma el quart bescanviador independent del generador de vapor.

4. Reescalfador de vapor: Aquest bescanviador es caracteritza per aportar a l'aigua del cicle de Rankine l'energia suficient per passar de vapor humit amb un títol de vapor molt alt a vapor sobreescalfat aplicant-li un increment de temperatura. A la sortida (punt 3) sol haver-hi el punt de màxima entalpia del cicle de Rankine, ja que s'obté alta temperatura a pressió més baixa que la del punt 1.

A diferència dels tres bescanviadors esmentats anteriorment, aquest es tracta per separat vist que el cabal màssic que necessita per cobrir la demanda energètica imposada pel cicle de Rankine és una desviació de part del cabal d'aigua de captació que arriba calenta després del seu pas pel subsòl. Aquest cabal màssic ( $\dot{m}_{p2}$ ) serà clarament menor al que alimenta els tres primers bescanviadors, ja que l'energia aportada també és menor, i abans d'entrar als bescanviador els fluxos d'aigua  $\dot{m}_{p1}$  i  $\dot{m}_{p2}$  estan a la mateixa pressió i temperatura (de fet és el mateix flux desviat en dos) i a la sortida també. D'aquesta forma, dues incògnites importants per poder dimensionar els quatre bescanviadors, les seves superfícies de bescanvi per exemple, són precisament aquests dos cabals màssics que s'adaptaran a aquestes condicions d'igual entalpia a l'entrada i a la sortida.

A més, considerant que l'aigua del circuit primari de captació (amb cabal  $\dot{m}_p$ ) està en estat estacionari, es pot escriure l'Eq. 5.14 que relaciona aquest dos cabals.

$$\dot{m}_p = \dot{m}_{p1} + \dot{m}_{p2} \quad (\text{Eq. 5.14})$$

En quant a la disposició dels fluxos dels dos cabals d'aigua (el del cycle de captació i el de Rankine), ens interessa que aquests siguin en sentits de circulació a contracorrent. D'aquesta forma l'eficiència dels tres bescanviadors que componen el generador de vapor serà màxima en cadascun d'ells. La Figura 5.19 mostra l'esquema que ha de tenir el generador de vapor en les seves quatre fases implementades en el cycle de Rankine; de forma que es visualitza molt bé en quins punts es fan les extraccions energètiques de l'aigua de captació provinent del circuit primari i quins noms rebran els diferents punts d'estudi del generador de vapor.

Els punts o1, o2, o3 i o4 i r1 i r2 de la Figura 5.18 i Figura 5.19 corresponen a les diferents temperatures de l'aigua provinent del cycle de captació (cycle inicial o zero, o) i els w0, w1, w2, w3, w4, w5 i w6 corresponen a les temperatures en cada fase de bescanvi de l'aigua del cycle de Rankine ("water", w).

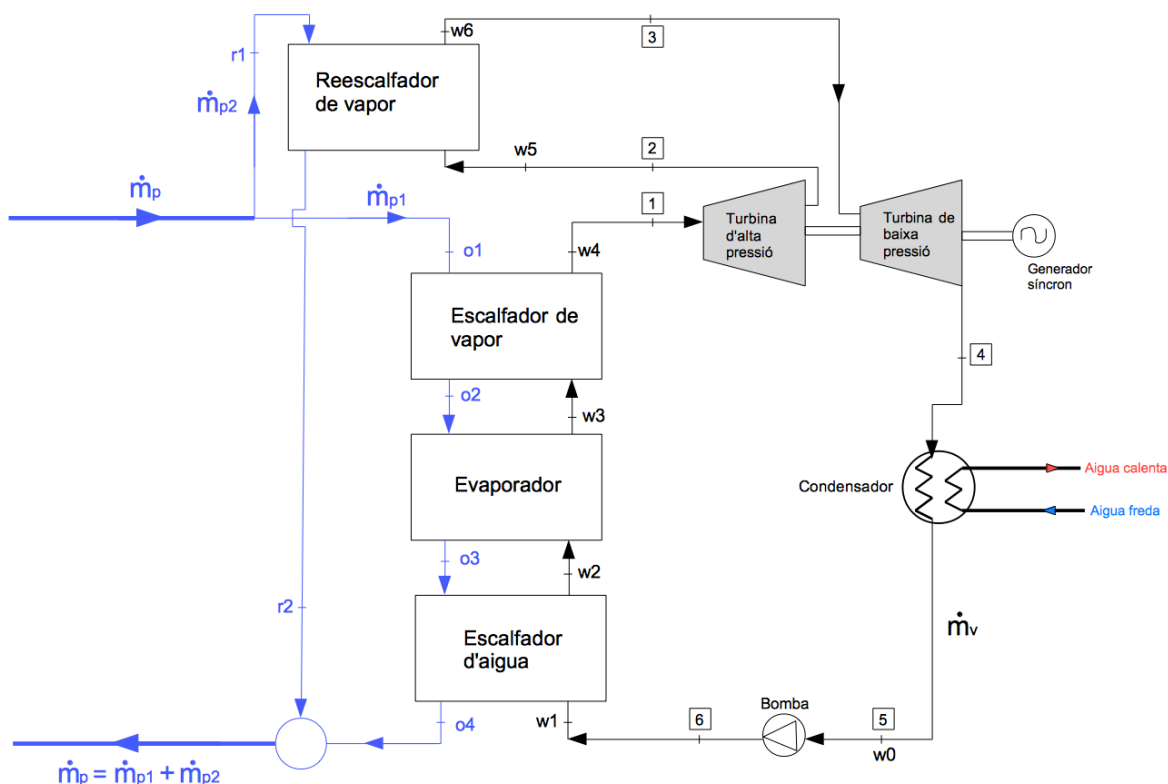


Figura 5.19. Fases del generador de vapor. (Font: Pròpia).



En quant a la part de càlculs realitzats pel generador de vapor, cal entendre al fer les operacions matemàtiques preliminars al disseny de la central es comença determinant tots els valors del cicle de captació realitzats als apartats anteriors, ja que gràcies a aquest es pot saber quanta energia es pot extreure del subsòl i a partir d'aquí es poden dimensionar els diferents components de la central per poder tractar una potència adaptable a la captació realitzada. Així ni es sobredimensiona la central ni viceversa.

#### Càlcul de temperatures, entalpies i cabals als diferents bescanviadors:

La **Taula 5.5** mostra els diferents valors de temperatura, pressió, entalpia i cabal de l'aigua de captació del circuit primari en els diferents punts d'estudi del generador de vapor. Cal tenir present que pels motius tècnics explicats en l'estudi de captació aquesta aigua està sempre en estat de líquid refredat.

Aigua de captació				
Punt	Pressió (bar)	Temp. (°C)	h (kJ/kg)	cabal (kg/s)
o1	150	339,0	1584,299	301,464
o2	150	335,9	1560,800	301,464
o3	150	295,0	1311,163	301,464
o4	150	260,0	1134,064	301,464
r1	150	339,0	1584,299	55,108
r2	150	260,0	1134,064	55,108

**Taula 5.5.** Valors per l'aigua de captació a cada punt d'estudi. (Font: Pròpia).

Per altre banda, a la **Taula 5.6** es mostren aquests paràmetres pels diferents punt de l'aigua del circuit secundari, afegint l'estat en que es troba a cada punt.

Aigua del cicle de Rankine					
Punt	Pressió (bar)	Temp. (°C)	h (kJ/kg)	cabal (kg/s)	Estat
w1	70	46,233	199,659	50,0	líq. refredat
w2	70	285,830	1267,437	50,0	líq. saturat
w3	70	285,830	2772,569	50,0	vap. saturat
w4	70	319,000	2914,252	50,0	vap. sobre.
w5	10	179,886	2596,037	50,0	vap. humit
w6	10	319,000	3092,267	50,0	vap. sobre.

**Taula 5.6.** Valors per l'aigua del Rankine a cada punt d'estudi. (Font: Pròpia).

A continuació es fa un anàlisi dels càlculs realitzats per obtenir els resultats de la **Taula 5.5** i **Taula 5.6**.

A) El primer pas és determinar les entalpies conegudes. Un cop estan definides les pressions de treball del cicle de Rankine i es coneixen les temperatures que es pretenen assolir (maximitzant l'extracció tèrmica de l'aigua provinent del cicle de captació de la que es coneix la seva entalpia), s'empren les taules de l'aigua per determinar l'entalpia als diferents punts. Així, ja d'entrada, es coneixen els valors de pressió, temperatura i entalpia pels punts o1 i r1 per part de l'aigua del circuit primari i w1, w4, w5 i w6 per part de l'aigua del circuit secundari.

B) Es troben les entalpies w2 i w3 sabent que a l'entrada de l'evaporador ha d'entrar-hi líquid saturat i a la sortida vapor saturat. La pressió i la temperatura de l'aigua del Rankine a l'evaporador no varien, però mitjançant les taules de l'aigua es poden trobar fàcilment aquestes entalpies a la pressió en qüestió.

C) Es fan les consideracions teòriques adequades pels càlculs que venen a continuació.

- ❖ L'aigua provinent del circuit primari a l'entrada dels tres bescanviadors en sèrie i a l'entrada del reescalfador està en les mateixes condicions al ser simplement aigua d'un mateix flux separada. Per tant,  $h_{o1} = h_{r1} = h_{p1}$ .
- ❖ L'aigua provinent del circuit primari a la sortida dels tres bescanviadors en sèrie i a la sortida del reescalfador ens interessa que estigui en les mateixes condicions per ajuntar els fluxos a la sortida, i poder determinar així quant cabal màssic es destina a cada bescanviador. Per tant,  $h_{o4} = h_{r2} = h_{p2}$ .

D) Es determinen els cabals màssics desviats a cada bescanviador. Vist que ja es coneixen les diferents entalpies referents a l'aigua del cicle de Rankine, es calcula quin és el cabal màssic que s'ha de desviar provinent de l'aigua de captació per poder aportar aquesta energia al reescalfador de vapor i al grup dels tres bescanviadors en sèrie. L'Eq. 5.15 mostra com es determina la taxa de calor d'un bescanviador (kW) si l'entalpia està en (kJ/kg) i el cabal màssic en unitats del S.I.

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot (h_{w\text{sortida}} - h_{w\text{entrada}}) = \dot{m}_o \cdot (h_{o\text{entrada}} - h_{o\text{sortida}}) \quad (\text{Eq. 5.15})$$

En aquest cas es considera el grup dels tres bescanviadors com a un sol bescanviador gran (per calcular l'energia que ha d'aportar l'aigua de captació desviada) i es calcula el amb l'expressió 2 la seva taxa de calor ( $\dot{Q}_S$ ) així com la del rescalfament entre els punts 2 i 3 del cicle de Rankine ( $\dot{Q}_R$ ):

- ❖  $\dot{Q}_S = \dot{m}_w \cdot (h_{w4} - h_{w1}) = \dot{m}_{p1} \cdot (h_{p1} - h_{p2})$
- ❖  $\dot{Q}_R = \dot{m}_w \cdot (h_{w6} - h_{w5}) = \dot{m}_{p2} \cdot (h_{p1} - h_{p2})$

Un cop es coneix ja aquest valor, i tenint en compte les assumpcions realitzades anteriorment es substitueix el cabal màssic desviat al reescalfador, tenint en compte l'Eq. 5.14, a la relació entre les taxes de calor calculades, i es troba així quin cabal màssic es desvia als tres bescanviadors en sèrie:

$$\frac{\dot{Q}_S}{\dot{Q}_R} = \frac{\dot{m}_{p1} \cdot (h_{p1} - h_{p2})}{\dot{m}_{p2} \cdot (h_{p1} - h_{p2})} = \frac{\dot{m}_{p1}}{\dot{m}_{p2}} = \frac{\dot{m}_{p1}}{\dot{m}_p - \dot{m}_{p1}} \rightarrow \dot{Q}_S \cdot (\dot{m}_p - \dot{m}_{p1}) = \dot{Q}_R \cdot \dot{m}_{p1} \rightarrow$$

$$\rightarrow \dot{Q}_S \cdot \dot{m}_p = \dot{m}_{p1} \cdot (\dot{Q}_R + \dot{Q}_S) \rightarrow \dot{m}_{p1} = \frac{\dot{Q}_S \cdot \dot{m}_p}{\dot{Q}_R + \dot{Q}_S}$$

D'aquesta forma es troba el cabal màssic desviat als tres bescanviadors en sèrie ( $\dot{m}_{p1}$ ) i restant aquest resultat sobre el cabal màssic total provinent del cycle de captació es troba el cabal desviat al reescalfador ( $\dot{m}_{p2}$ ). Els resultats són 301,464 i 55,108 (kg/s) respectivament i s'anoten a la Taula 5.5 pels punts afectats pel cabal que li correspongui seguint l'esquema de la Figura 5.19.

E) Es calculen les entalpies desconegudes de l'aigua del cycle primari. Si es vol començar per calcular quina és l'entalpia de sortida dels dos grups de bescanvi simplement es substitueixen els valors dels cabals trobats a les expressions de càlcul de les taxes de calor. Agafant, per exemple, la del reescalfador:

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_w \cdot (h_{w6} - h_{w5}) = \dot{m}_{p2} \cdot (h_{p1} - h_{p2}) \rightarrow h_{p2} = h_{p1} - \frac{\dot{Q}_R}{\dot{m}_{p2}}$$

Per les entalpies restants s'aplica el mateix balanç energètic de l'Eq. 5.15 per l'escalfador de vapor i per l'evaporador. Les entalpies a la sortida de cada bescanviador:

$$\text{Escalfador de vapor: } h_{o2} = h_{o1} - \frac{\dot{m}_w \cdot (h_{w4} - h_{w3})}{\dot{m}_{p1}}$$

$$\text{Evaporador: } h_{o3} = h_{o2} - \frac{\dot{m}_w \cdot (h_{w3} - h_{w2})}{\dot{m}_{p1}}$$

Escalfador d'aigua: Es manté l'assumpció on  $h_{o4} = h_{r2} = h_{p2}$ .

Reescalfador: Es manté l'assumpció on  $h_{o4} = h_{r2} = h_{p2}$ .

F) Es calculen les diferents temperatures que deriven de les entalpies calculades tant per l'aigua del circuit primari com per la del secundari i s'apunten a la Taula 5.5 i Taula 5.6 mostrades anteriorment.

Càlcul de l'eficiència, potència i superfície de captació de cada bescanviador:

Primer de tot, es calcula la taxa de calor o potència tèrmica intercanviada a cada bescanviador de forma molt senzilla aplicant l'Eq. 5.15. Simplement cal veure l'increment d'entalpia de l'aigua del

circuit secundari entre l'entrada i sortida del bescanviador en qüestió i multiplicar-ho pel cabal màssic de l'aigua d'aquest cicle. Dóna exactament el mateix resultat fent el producte de la reducció d'entalpia de l'aigua del circuit primari i el cabal que circula pel bescanviador en qüestió. Els resultats s'apunten a la **Taula 5.7**.

A continuació es troba l'eficiència de cada bescanviador en tant per ú (pu). El procés és ben senzill si s'aplica l'**Eq. 5.16** l'únic que cal anar en compte és que el valor del calor específic de l'aigua anirà variant a mesura que aquesta s'escalfa. Per aquest motiu la  $C_{min}$  de l'**Eq. 5.16** no és contant en els casos dels dos escalfadors d'aigua (líquida i en forma de vapor). L'evaporador és una excepció vist que la  $C_{min}$  estarà determinada únicament per l'aigua de captació, ja que l'aigua del cicle de Rankine no presenta increment de temperatura.

$$\mathcal{E}_{(pu)} = \frac{\dot{Q}_{Bescanvi}}{C_{min} \cdot (T_{c1} - T_{f1})} \quad (\text{Eq. 5.16})$$

On:

- $T_{c1}$  és la temperatura més calenta de l'aigua de captació, la d'entrada.
- $T_{f1}$  és la temperatura més freda de l'aigua del Rankine, també la d'entrada.
- $\dot{Q}_{bescanvi}$  és calculada en anteriorment per cada bescanviador.
- $C_{min}$  és el mínim entre  $C_{calent}$  i  $C_{fred}$ .
- $C_{calent}$  ( $C_c$ ) varia i és:  $C_c = C_o \cdot \dot{m}_o \rightarrow$  on  $C_o = \Delta h / \Delta T$  i  $\dot{m}_o$  és  $\dot{m}_{p1}$  o  $\dot{m}_{p2}$  depenent del bescanviador estudiat en cada cas.
- $C_{fred}$  ( $C_f$ ) varia i és:  $C_f = C_w \cdot \dot{m}_w \rightarrow$  on  $C_w = \Delta h / \Delta T$
- $\mathcal{E}_{pu}$  = Eficiència en tant per ú (pu)

Els resultats d'aquest càlcul també s'inclouen a la **Taula 5.7** (amb l'eficiència en %).

Bescanviador	Q besc. (kW)	Cf	Cc	Cmin	ε (%)
Escalfador d'aigua	53388,928	222,828	1525,313	222,828	96,299
Evaporador	75256,601	-	1840,702	1840,702	81,619
Escalfador de vapor	7084,119	213,570	2301,884	213,570	62,385
Reescalfador	24811,493	178,353	314,212	178,353	87,430

**Taula 5.7.** Potència i eficiència de cada bescanviador. (Font: Pròpia).

L'últim càlcul a realitzar és el de les superfícies de bescanvi. S'haurà de tenir en compte els coeficients de transferència de calor de cada bescanviador i aplicar l'**Eq. 5.17**.

$$S_{bescanviador} = \frac{\dot{Q}_{Bescanvi}}{\Delta T_{ml} \cdot U_m} \quad (\text{Eq. 5.17})$$

On:

- $S_{\text{bescanviador}}$  és la superfície (en  $\text{m}^2$ ) per la qual s'intercanvia l'energia del procés.
- $\dot{Q}_{\text{bescanvi}}$  és calculada en anteriorment per cada bescanviador.
- $Um$  és el coeficient de transferència de calor de cada bescanviador. S'hauran de suposar i són per cada bescanviador els que es veuen a la **Taula 5.8**.
- $\Delta T_{ml}$  és l'increment de temperatura mitja logarítmica, que com ja sabem es calcula com s'observa a l'**Eq. 5.18**. Els increments  $T1$  i  $T2$  es determinen amb la relació de temperatures per un flux a contracorrent. On  $\Delta T1 = T_{c1} - T_{f2}$  i  $\Delta T2 = T_{c2} - T_{f1}$ .

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)} \quad (\text{Eq. 5.18})$$

Per suposar els coeficients de transferència de calor de cada bescanviador s'han aproximat segons els possibles rangs habituals en evaporadors (49) i la resta de bescanviadors com l'escalfador de vapor, l'escalfador d'aigua o el reescalfador. Vist que la determinació d'aquest coeficients de transferència de calor es realitza a partir del càlcul dels coeficients de brutícia dels tubs i altres dades que caldria suposar, és millor suposar directament els coeficients finals per tenir una idea aproximada de la superfície de transferència que serà necessària en els diferents bescanviadors. Els valors suposats permeten una aproximació bastant propera a la realitat.

Els resultats de la potència tèrmica desenvolupada per cada bescanviador del generador de vapor, la seva eficiència, els coeficients de transferència de calor mitjos i la seva superfície de bescanvi han sigut anotats a la **Taula 5.8**.

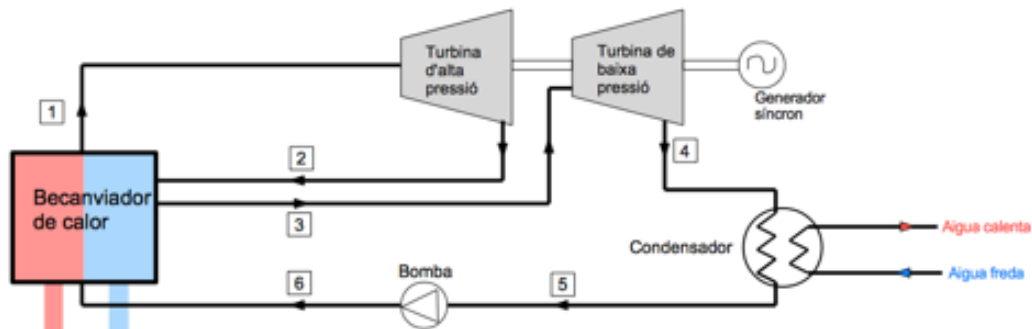
Bescanviador	$Um$ ( $\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ )	$\Delta T1$ (K)	$\Delta T2$ (K)	$\Delta T_{ml}$ (K)	$Q_{\text{besc.}}$ (kW)	Superfície ( $\text{m}^2$ )
Escalfador aigua	0,9	9,208	213,803	65,054	53388,928	911,877
Evaporador	2	50,092	9,208	24,137	75256,601	1558,916
Escalfador vapor	2	20,000	50,092	32,776	7084,119	108,070
Reescalfador	2	20,000	80,150	43,331	24811,493	286,305
Total	-	-	-	-	160541,141	2865,168

**Taula 5.8.** Superfície de cada bescanviador i valors requerits per calcular-la. (Font: Pròpia).

### 5.2.2.2. Les turbines

Tenint en compte que el turbinat més eficient per una central com la tractada és el format per una turbina d'alta pressió i una de baixa, la Figura 5.20 (que és un augment de la part del cicle de Rankine

de la Figura 5.14 i segueix el tipus de cicle vist a la Figura 5.17) permet observar quins seran els punts d'intervenció de les turbines.



**Figura 5.20.** Esquema del cicle de Rankine estudiat (Font: Pròpia).

En aquest cas, seguint els punts plantejats en un principi, la turbina d'alta pressió actuarà per passar del vapor sobreescalfat del punt 1 a alta pressió a vapor humit en el punt 2 a una pressió i temperatura molt menors.

Per altre banda, després d'un reescalfament d'aquest vapor humit del punt 2 passant de nou pel generador de vapor, la turbina de baixa pressió permetrà obtenir energia del vapor reescalfat del punt 3. Concretament, el pas pel generador de vapor és únicament per l'escalfador de vapor, com s'ha vist anteriorment. Un cop passa aquest vapor sobreescalfat per a turbina de baixa pressió, al punt 4 en resulta aigua a no molt alta temperatura i a la pressió més baixa de tot el cicle de Rankine (la mateixa que després del pas pel condensador).

Serà interessant doncs, coneixent d'apartats anteriors els valors de les entalpies als punts 1 i 3, quins resultats tenen les entalpies de la sortida d'ambdues turbines.

#### Turbina d'alta pressió:

El procés és isentròpic, per tant, coneixent l'entropia al punt 1 ( $S_1$ ) i el rendiment isentròpic de la turbina (donat pel fabricant) es pot calcular fàcilment l'entropia al punt 2 ( $S_2$ ) i a partir d'aquesta les altres propietats.

Al ser un procés isentròpic  $S_1 = S_{2s}$ ; que es relaciona amb el títol de vapor al punt 2 isentròpic ( $X_{2s}$ ), aquell on la turbina és ideal, seguint l'Eq. 5.19.

$$X_{2s} = \frac{S_{2s} - S_{líq.sat}}{S_{vap.sat} - S_{líq.sat}} \quad (\text{Eq. 5.19})$$

A partir del títol de vapor del punt 2 isentròpic es pot trobar fàcilment l'entropia  $h_{2s}$  ja sigui fent servir l'Eq. 5.20 o bé amb un fitxer de dades amb les taules implementades que simplement introduint l'entropia  $S_{2s}$  i la pressió de treball d'aquell punt ja ens doni totes les propietats.

$$h_{2s} = X_{2s} \cdot h_{vap.sat} + (1 - X_{2s}) \cdot h_{liq.sat} \quad (\text{Eq. 5.20})$$

Ja sigui amb fitxers de dades (l'Excel de les taules de l'aigua del que dispo, per exemple) o a partir de les equacions anteriors la següent equació s'ha d'aplicar d'igual manera un cop es coneix  $h_{2s}$ . És Eq. 5.21 i relaciona el rendiment isentròpic ( $\eta_{ts1}$ ) de la turbina amb les entalpies de sortida en el cas de turbina ideal i en el cas real on s'aplica aquest rendiment.

$$\eta_{ts1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (\text{Eq. 5.21})$$

Aïllant es pot obtenir de forma senzilla l'única incògnita, el valor de l'entalpia al punt 2 ( $h_2$ ). A partir d'aquest es pot trobar el nou títol de vapor, l'entropia i altres característiques en aquest punt (recordar que la temperatura i la pressió no canvien al trobar-se en condicions de saturació tant al punt 2 real com al punt 2 isentròpic). Els valors de les entalpies es van afegint a la Taula 5.4 que permet visualitzar les propietats bàsiques a tots els punts del cicle.

#### Turbina de baixa pressió:

Es repeteix exactament el procés realitzat en la turbina d'alta pressió però tenint en compte que ara  $S_3 = S_{4s}$  i que s'ha d'aplicar el rendiment isentròpic de la segona turbina a les equacions ( $\eta_{ts2}$ ). Ja sigui amb els fitxer especialitzats amb les taules incorporades o amb les Eq. 5.20 i Eq. 5.21 aplicades s'obté l'entalpia  $h_{4s}$  per tornar aplicar l'Eq. 5.21 entre el punt 3 ( $h_3$ ) i el punt 4 per obtenir  $h_4$ . A partir de l'entalpia es poden trobar altres paràmetres d'aquest punt. Els valors importants són apuntats a la Taula 5.4.

#### **5.2.2.3. El condensador i el cicle terciari**

El condensador del cicle de Rankine té la funció de eliminar qualsevol part de vapor del vapor humit existent a la sortida de la turbina de baixa pressió. D'aquesta forma, l'objectiu del condensador és obtenir a la sortida aigua en estat de líquid saturat perquè posteriorment pugui passar per la bomba i pujar-ne la pressió de nou a la que s'havia començat el cicle. Si aquesta aigua no estigués en estat de líquid saturat, l'energia que caldria subministrar a la bomba seria molt major i el rendiment tèrmic del cicle de Rankine més baix (i això que al condensador és on més energia es perd).

El càlcul de l'entalpia de l'aigua del cicle de Rankine al punt 5 (sortida del condensador) es fa mirant el seu valor a les taules de l'aigua en condicions de saturació quan està en estat de líquid saturat a la

pressió de treball del punt en qüestió. L'entalpia  $h_5$  i els altres valors interessant s'apunten a la **Taula 5.4**.

Per altre banda, és interessant veure quin ús es dona a l'aigua d'un tercer cicle que s'ha emprat per refredar l'aigua del cicle de Rankine. Aquesta aigua inicialment freda s'escalfarà i pot actuar de diferents formes:

- A) Pot tenir un ús com energètic cobrint la demanda d'aigua calenta en pobles propers. Aquesta aplicació, coneguda pel terme en anglès "*District Heating*", és molt comú en països freds per l'aclimatació domèstica i d'infraestructures com escoles, hospitals i altres. D'aquesta forma tot i que el rendiment elèctric de la central no millora, vist que l'electricitat produïda a les turbines és igual, l'eficiència global sí que ho fa. Bàsicament es deu a que la pròpia aigua calenta té energia emmagatzemada i distribuïble que cal sumar al total d'energia generada. En països més càlids les llars no estan pensades per rebre aquest tipus d'energia, es sol contar amb una caldera de gas. Tanmateix pot ser útil a grans ciutats per distribuir ACS (Aigua Calenta Sanitària) a construccions properes a la central.
- B) Pot no tenir cap ús i suposar un problema. Literalment, en aquest cas caldria fer una gran inversió per reduir la temperatura d'aquesta aigua i que compleixi amb les condicions d'impacte ambiental marcades pel marc regulador del propi país on s'instal·la la central. Aquesta inversió sol traduir-se en la instal·lació de torres de refrigeració i d'un tercer cicle d'aigua de refrigeració.

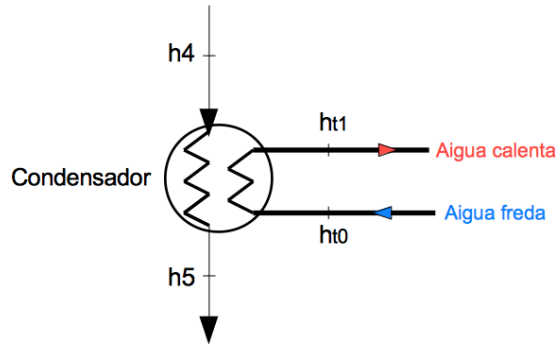
Independentment de l'opció triada, els càlculs necessaris per dimensionar el condensador del cicle de Rankine i trobar-ne les temperatures de l'aigua emprada per refredar la del cicle de Rankine, són els mateixos. Primer de s'identifiquen les propietats bàsiques de l'aigua del cicle de Rankine tant a l'entrada com sortida del condensador. El cabal màssic serà el del propi cicle i les propietats les del punt 4 i 5 que es poden apreciar a la **Taula 5.4**.

A continuació, cal saber quina és la temperatura i pressió de l'aigua de refrigeració emprada. En la majoria de centrals i en aquesta també, s'utilitza aigua d'un embassament proper a la central a pressió atmosfèrica i a la temperatura que correspongui al dia en qüestió. Per evitar realitzar càlculs estacionals, es suposa una temperatura mitja de l'aigua estancada constant per tot l'any igual a 10 °C. S'omet l'estudi de subministrament de "*District Heating*" i s'estudia la implementació d'una torre de refrigeració. El primer pas és dimensionar el condensador per saber el cabal màssic d'aigua que requereix el circuit terciari o de refrigeració.

#### Dimensionament del condensador:



Es tracta el condensador com un bescanviador més i es calcula fàcilment quin cabal màssic d'aigua requerirà el circuit terciari per una temperatura de sortida del condensador fixada segons els interessos del productor energètic. La Figura 5.21 mostra un esquema del condensador; amb les entalpies corresponents als punts 4 i 5 del cicle secundari per una banda i les entalpies de l'aigua de refrigeració del circuit terciari abans de passar pel condensador ( $h_{t0}$ ) i després ( $h_{t1}$ ).



**Figura 5.21.** Esquema del condensador. (Font: Pròpia).

Entre els punts 4 i 5 del cicle de Rankine circularà el cabal màssic que correspon al propi cicle i entre el punt t1 i t2 del cicle terciari circularà el cabal màssic que precisament és la incògnita a trobar. En el cicle terciari, la temperatura que alimenta el condensador és de 10 °C seguint la suposició anterior, mentre que la de sortida del condensador s'estableix que ha de ser de 43°C per ser posteriorment rebaixada a la torre de refrigeració. La **Taula 5.9** mostra els diferents valors fonamentals de l'aigua en els quatre punts esmentats. A partir d'aquest es calcula el cabal del cicle terciari d'aigua aplicant l'Eq. 5.15, de forma que:

$$\dot{m}_w(h_{Wentrada} - h_{Wsortida}) = \dot{m}_t(h_{Osortida} - h_{Oentrada}) \rightarrow \dot{m}_t = \frac{\dot{m}_w(h_{Wentrada} - h_{Wsortida})}{(h_{Osortida} - h_{Oentrada})}$$

$$\rightarrow \dot{m}_t = \frac{\dot{m}_w(h_4 - h_5)}{(h_{t1} - h_{t2})}$$

El resultat de l'operació és un cabal màssic de 794,43 kg/s que també s'apunta a **Taula 5.9**.

Punt	Cicle	Pressió (bar)	Temp.(°C)	h (kJ/kg)	cabal (kg/s)
4	secundari	0,100	45,808	2385,095	50,000
5	secunadri	0,100	45,808	191,812	50,000
t1	terciari	1,013	10,000	42,119	794,430
t2	terciari	1,013	43,000	180,160	794,430

**Taula 5.9.** Balanç energètic al condensador (Font: Pròpia).

A continuació es repeteix el procediment de les equacions Eq. 5.16, Eq. 5.17 i Eq. 5.18 i es calcula l'eficiència del condensador i la superfície de bescanvi necessària (repetint els càlculs realitzats pels 4 bescanviadors realitzats anteriorment amb els nous valors de temperatures, pressions, entalpies i cabals màssic mostrats als punts de Taula 5.9). Els resultats s'apunten a la Taula 5.10.

Bescanviador	Q besc.(kW)	U (kW/(m <sup>2</sup> ·K))	$\Delta T_{ml}$ (K)	S (m <sup>2</sup> )	Ef (%)
Condensador	109664,123	1,000	12,962	8460,245	92,159

Taula 5.10. Paràmetres bàsics del condensador (Font: Pròpia).

#### Torre de refrigeració:

Sinó es fes un refredament adequat de l'aigua calenta sortint del condensador del cicle de Rankine, es podria posar en perill els ecosistemes propers a la central en cas d'abocar-la a mars, rius o aqüífers. Per aquest motiu, les pròpies normatives legislatives que s'apliquen a un productor elèctric obliguen a aquest a desfer-se de l'aigua sota uns paràmetres concrets. Per complir amb aquests paràmetres es sol donar sortida a l'excedent d'aigua calenta de la central mitjançant l'ús de torres de refrigeració.

Una torre de refrigeració té un funcionament semblant al d'un bescanviador aigua-aire. Es genera un flux d'aire ascendent que gràcies a un intercanvi amb petites gotes de l'aigua provinent del condensador aconseguix refredar-la i expulsar-la. Aquestes gotes d'aigua venen generades per uns dispersadors especials que distribueixen l'aigua d'aquesta forma. (50). A la Figura 5.22 es pot apreciar un dibuix esquemàtic d'un cicle de refrigeració amb torre com el descrit.

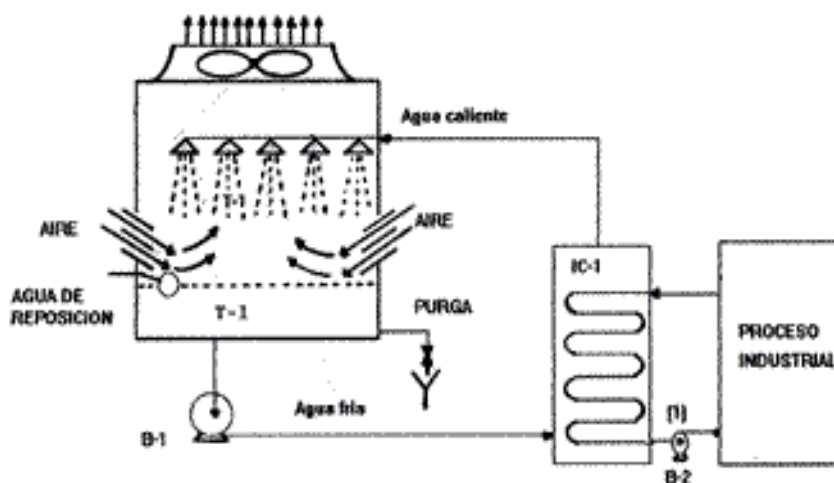


Figura 5.22. Exemple de cicle de refrigeració (Font: martinfix.blogspot (51))

Com s'aprecia en la mateixa Figura 5.22 a la torre de refrigeració hi ha unes aspes en forma de ventilador a la sortida, doncs bé, es fa justament per generar aquest flux d'aire ascendent. El vapor que es pot observar sovint a la sortida de les torres de refrigeració és degut a la part de l'aigua (de les gotes que s'enfreden i cauen cap al subministrament d'aigua) que s'evapora. L'aigua que cau assumeix la mateixa realitza un intercanvi de calor amb l'aire, pendent-se part d'aquesta aigua, i retorna al condensador creant així un cicle terciari. Per recuperar aquesta part d'aigua perduda amb l'intercanvi amb l'aire, es necessita aigua de reposició provinent de l'embassament proper a la central. (50).

A continuació s'analitza el procés que du a terme les gotes d'aigua calentes provinents del condensador amb l'aire. El primer pas consisteix en determinar el cabal màssic d'aire requerit per dur a terme tota aquesta operació per refredar l'aigua. Es calcula mitjançant una fórmula derivada del balanç energètic de l'Eq. 5.15.

$$\dot{m}_{w1} \cdot (h_{t1} - h_{t2}) = \dot{m}_{aire} \cdot (h_{a1} - h_{a0}) \rightarrow \text{S'aïlla } \dot{m}_{aire}$$

Cal fer varies assumpcions per determinar les entalpies de l'aire agafat de l'exterior de la central i el que surt un cop realitzat l'intercanvi amb les petites gotes d'aigua, vist que segons la seva temperatura i humitat relativa els resultats del cabal màssic d'aire requerit canviaran molt. A la **Taula 5.11** es poden veure els valors de temperatura assumits per l'aire tant per l'aire atmosfèric de l'exterior de la central com aquest mateix aire un cop s'ha realitzat l'intercanvi, així com la humitat relativa (HR) als dos punts esmentats. Es considera que l'aire atmosfèric a0 està durant tot l'any a una temperatura de 10°C amb una humitat relativa del 65%. Per altre banda, es desitja que, com marca la normativa, l'aire de sortida de la torre de refrigeració no superi els 35 °C i que la humitat relativa sigui del 95%. Òbviament, la pressió és l'atmosfèrica.

Punt	Pressió (bar)	Tem. (°C)	HR (%)
a0	1,01325	15	65
a1	1,01325	35	95

**Taula 5.11.** Pressió, temperatura i HR de l'aire a l'entrada i sortida de la torre de refrigeració. (Font: Pròpia).

A continuació es determina l'entalpia de l'aire pels valors de la **Taula 5.11**. Per fer-ho, cal trobar abans la humitat absoluta (W) de l'aire en els dos punts d'estudi. La humitat absoluta es calcula amb una relació entre la pressió a la part corresponent a d'aigua dintre l'aire estudiat ( $p_w$ ) i la pressió del propi aire (l'atmosfèrica;  $p_{atm}$ ). Per trobar la primera d'aquestes és necessari trobar amb antelació la pressió

de saturació de l'aire ( $p_{ws}$ ), que es fa amb la següent relació amb la temperatura del punt d'estudi  $T$  (en Kèlvins); veure **Eq. 5.22**.

$$\ln(p_{ws}) = 14,293 - \frac{5291}{T} \quad (\text{Eq. 5.22})$$

Fàcilment s'aïlla i es calcula  $p_{ws}$  per les temperatures dels punts  $a0$  i  $a1$  (el resultat obtingut és en bars). Posteriorment es calcula la pressió corresponent a l'aigua relacionant aquesta pressió amb la humitat relativa de l'aire en cada punt amb l'**Eq. 5.23**.

$$p_w = HR \cdot p_{ws} \quad (\text{Eq. 5.23})$$

La relació entre les pressions esmentades i la humitat absoluta és la que es visualitza a l'**Eq. 5.24** es calcula també aquest valor pels dos punts d'estudi de l'aire.

$$W = 0,622 - \frac{p_w}{p_{atm} - p_w} \quad (\text{Eq. 5.24})$$

Finalment, es calcula el valor de l'entalpia als dos punts d'estudi de l'aire que, al cap i a la fi, és el valor que interessa trobar per poder calcular el cabal màssic d'aire requerit per la torre de refrigeració. La fórmula que relaciona aquesta entalpia amb la humitat absoluta de l'aire al punt " $i$ " ( $W_i$ ) i la seva temperatura ( $T_i$ ), és l'**Eq. 5.25**.

$$h_i = 1,004 \cdot T_i + W_i (2500,6 + 1,86W_i) \quad (\text{Eq. 5.25})$$

Els resultats que s'han anat obtenint al llarg del procediment de determinació de l'entalpia de l'aire en els dos punts d'estudi s'anoten a la **Taula 5.12**.

Punt	Pressió (bar)	Temp. (°C)	$p_{ws}$ (bar)	HR (pu)	$p_w$ (bar)	W (pu)	h (kJ/kg)
a1	1,01325	15	0,0169	0,65	0,011	0,0068	32,3307
a2	1,01325	35	0,0558	0,95	0,053	0,0344	123,2778

**Taula 5.12.** Característiques principals de l'aire als dos punts d'estudi  $a0$  i  $a1$ . (Font: Pròpia).

Finalment, es calcula el cabal màssic d'aire necessari amb l'equació plantejada al principi d'aquestes operacions, com es pot veure en resulta:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{\dot{m}_{w1} \cdot (h_{t1} - h_{t2})}{(h_{a1} - h_{a0})} \rightarrow \dot{m}_{aire} = 1205,802 \text{ kg/s.}$$

Coneixent aquest cabal màssic d'aire, es pot calcular el cabal màssic d'aigua de reposició que requereix la torre de refrigeració des del dipòsit per satisfer la part corresponent d'aigua del propi cabal d'aire. Aquest cabal ( $\dot{m}_{wr}$ ) es calcula amb l'Eq. 5.26.

$$\dot{m}_{wr} = \dot{m}_{aire} \cdot (W_{a1} - W_{a0}) \quad (\text{Eq. 5.26})$$

El cabal màssic resultant és de 33,186 kg/s. Aquesta és la quantitat d'aigua que s'agafa del dipòsit d'aigua cada segon per abastir la torre de refrigeració que permet refredar l'aigua del circuit terciari i alhora permetre el bon funcionament del condensador del cicle de Rankine.

#### 5.2.2.4. Grup de bombeig del cicle de Rankine

En aquest cas el grup de bombeig del cicle de Rankine consisteix en una bomba de gran potència capaç de subministrar l'energia requerida per pujar la pressió del punt 5 fins als 70 bar del punt 6. El primer pas a realitzar per poder dimensionar aquesta bomba és calcular l'entalpia del punt 6s i a partir de  $h_{6s}$  es troba la del punt 6 tenint en compte el rendiment isentròpic de la bomba.

L'energia aportada per la bomba (en kJ/kg) es calcula aplicant l'Eq. 5.27 que relaciona l'increment de pressió amb la densitat de l'aigua en el punt d'entrada a la bomba. On la pressió després del pujar-la a la bomba és la del punt 6 ( $P_6$ ) i la d'entrada és la del punt 5 ( $P_5$ ).

$$w_b = \frac{P_6 - P_5}{\rho_5} \quad (\text{Eq. 5.27})$$

Les taules de l'aigua implementades en l'Excel donen directament el valor de la densitat al punt 5 ( $\rho_5$ ), en cas que es faci en les taules convencionals, es fa la inversa del volum específic de l'aigua en estat de líquid saturat a la pressió del punt 5. Un cop obtingut aquest valor es troba  $h_{6s}$  amb l'Eq. 5.28.

$$h_{6s} = h_5 + w_b \quad (\text{Eq. 5.28})$$

S'aplica el rendiment isentròpic de la bomba, que és diferent al de la turbina, i segueix l'expressió 7.

$$\eta_B = \frac{h_{6s} - h_5}{h_6 - h_5} \quad (\text{Eq. 5.29})$$

Aïllant es troba l'única incògnita de l'Eq. 5.29 que és precisament l'entalpia al punt 6. Una manera alternativa de fer aquest càlcul és realitzant la relació de l'entropia entre el punt 5 i el punt 6s per trobar  $h_{6s}$  que correspon a la nova entalpia a aquella entropia a la nova pressió augmentada. Posteriorment s'aplica de nou l'expressió 7, el resultat obtingut varia a partir del cinquè decimal, de forma que ambdós per determinar  $h_{6s}$  poden ser considerats com a bons. Els resultats s'anoten a la Taula 5.4.

### 5.2.2.5. Resultats del grup de transformació a energia mecànica

Ara que ja es disposa dels valors de totes les entalpies, temperatures i pressions a tots els punts del cicle es calculen les potències dels components del cicle mitjançant l'Eq. 5.30.

$$\dot{Q}_{component} = \dot{m}_w \cdot (h_{alta} - h_{baixa}) \quad (\text{Eq. 5.30})$$

Es diferencia entre l'entalpia "alta" i "baixa" perquè varia l'ordre d'entrada-sortida del valor alt i baix segons si el component subministra energia a l'aigua del cicle o n'extreu. Per exemple, aplicant l'expressió 8 per la bomba s'obté:

$$N_{bomba} = \dot{Q}_{bomba} = \dot{m}_w \cdot (h_6 - h_5)$$

Mentre que per la turbina de baixa pressió, per exemple.

$$N_{t1} = \dot{Q}_{turbina1} = \dot{m}_w \cdot (h_1 - h_2)$$

D'aquesta forma es troben els valors de totes les potències per cada fase del cicle de Rankine i s'anoten a la **Taula 5.13** (que inclou si s'extreu o s'aporta energia a l'aigua pel pas per cada component i la sigla que es dona a la potència extreta o aportada).

Component	Aportació energètica	Sigles	Potència (kW)
Generador de vapor de 1 a 6	Subministra	Q <sub>o1</sub>	153729,65
Turbina d'alta pressió	Extreu	N <sub>t1</sub>	15910,71
Reescalfador	Subministra	Q <sub>o2</sub>	24811,49
Turbina de baixa pressió	Extreu	N <sub>t2</sub>	35358,63
Condensador	Extreu	Q <sub>c</sub>	109664,12
Bomba d'aigua	Subministra	N <sub>bomba</sub>	392,32

**Taula 5.13.** Aportació de potència de cada component. (Font: Pròpia).

Finalment, tenint en compte que amb la torre de refrigeració no es pot comptabilitzar l'energia extreta al cicle de Rankine al condensador, es calcula el rendiment tèrmic del cicle de Rankine de la següent l'Eq. 5.31.

$$\eta_{Rankine} = \frac{N_{t1} + N_{t2} - N_{bomba}}{Q_{o1} + Q_{o2}} \quad (\text{Eq. 5.31})$$

El resultat es passa a percentatge i s'obté un rendiment tèrmic del cicle del 31,69%. La potència mecànica obtinguda de sumar la potència desenvolupada per cada turbina i restar-li la part que absorbeix la bomba és de 50877,02 kW. De totes formes no és la potència que es podrà subministrar

a la xarxa elèctrica; cal considerar el pas pel generador síncron que s'encarrega de transformar aquesta energia mecànica en energia elèctrica seguint els conceptes que s'expliquen a l'apartat següent.

### 5.2.3. Grup de transformació a energia elèctrica

Realment en aquest apartat no s'ha volgut aprofundir en l'estudi teòric dels elements necessaris per transformar l'energia mecànica de rotació de les turbines a energia elèctrica, vist que no entra dintre de l'àmbit d'aplicació d'aquest projecte. Caldria tenir en compte molts elements per fer factible la connexió de la central a la xarxa elèctrica que no es considera necessari esmentar.

Tanmateix, és interessant tractar els elements més bàsics. Un cop l'eix de les turbines d'alta i baixa pressió gira impulsat per l'aigua del cicle de Rankine (per la que ha calgut fer totes les adaptacions vistes en l'apartat corresponent al grup de transformació a energia mecànica), es connecta un generador síncron convencional que s'adapti a les característiques i potències subministrades per aquestes en funcionament nominal de la central. Gràcies a aquest generador síncron o alternador, compostat per una part mòbil (rotor) que gira degut a la velocitat angular de l'eix de les turbines i una part fixe (estator).

En la màquina síncrona el rotor, pel que circulen Corrents Continus (CC) és l'element inductor vist que serà el que indueixi un camp magnètic a l'estator. Ja tingui un debanat concentrat (de pols sortits) o un debanat distribuït en ranures (de rotor cilíndric) el rotor aplicarà un camp magnètic al girar que serà rebut pel debanat induït de l'estator pel que circulen Corrent Alterns (CA). La llei de Faraday-Lenz permet entendre com es transmet el camp magnètic del rotor per un corrent d'excitació definit a l'estator, generant tensió als borns d'aquest i permetent així tenir un corrent d'induït generant electricitat. No es considera necessari entrar més en detall en la transformació realitzada a l'interior d'una màquina síncrona.

Aquesta màquina tindrà un rendiment associat, i això sí que afectarà sobre la potència final entregada per la central. Aquest rendiment s'ha considerat en els càlculs del 97 %, que sol estar dintre del rang de rendiments per centrals d'alta potència basades en un cicle de Rankine.

Amb la potència mecànica de 50877,02 kW, s'obté una potència elèctrica pel rendiment del 97 % del generador igual a 49350 kW. Per tant la potència instal·lada de la central és de 49,35 MW.

## 6. Normatives aplicables al treball

És evident que tractar tota la regulació que comporta el disseny, el dimensionament, la construcció i l'operació d'una central no és l'objectiu d'aquest estudi, vist que hi ha moltes normes a tractar abans que l'Estat on s'ubiqui la central et deixi posar-la en funcionament (com és lògic i comprensible, vist que les mesures de seguretat han de ser molt estrictes per evitar incidències greus). A més, el projecte que s'ha realitzat és un estudi que no contempla la part referida a la normativa involucrada en la central volcànica, sinó que s'estudia des del punt de vista tècnic tant com per dimensionament com per modelització del procés de captació energètica.

Malgrat això, és interessant veure quina serien les normatives més importants que s'haurien de tenir en compte en cas que la central estigués operativa. Vist que la normativa varia segons el país on s'ubiqui la central, es decideix fer aquest estudi on s'esmenten les parts més importants del marc regulador d'una central geotèrmica (de tipus renovable) com si estigués ubicada a Espanya, concretament a Catalunya.

A continuació es mostres els dos estudis més representatius de les normatives aplicables a una central volcànica com la realitzada en aquest projecte de 49,35 MW, vist que si un hipotètic client s'aprofités d'aquest projecte per invertir en la construcció d'aquesta (després de completar molts càlculs i realitzar altres projectes de disseny i construcció de la central) hauria de tenir en compte aquests dos estudis per començar a retribuir-se amb l'activitat:

1. Estudi d'implementació: Referent als requisits per poder instal·lar la central
2. Estudi de mercat: Referen a quines lleis regulen (les més importants) el mercat diari on el productor vendrà l'energia un cop la central estigui implementada i en funcionament.

### 6.1. Normatives associades a l'estudi d'implementació

Quan es desitja realitzar una instal·lació d'un central productora a un país membre de la Unió Europea, el primer pas és consultar què diu el marc europeu en quant als requisits que cal complir per poder realitzar els procediments administratius necessaris dur a terme aquesta operació. D'aquesta forma, el procediment que autoritza aquesta instal·lació o procediment d'autorització per noves instal·lacions es troba regulat com dicta la Directiva 2009/72/CE.

L'Article 7 d'aquesta Directiva especifica que els Estats membre hauran d'adoptar un procediment d'autorització objectiu, transparent i no discriminatori fixat pels propis Estats per atorgar les autoritzacions de construcció per a noves instal·lacions generadores d'energia elèctrica dintre del seu



territori. En altres paraules, passa a ser competència de l'Estat on es troba la central: es va a observar doncs el marc regulador espanyol.

Tanmateix, el marc regulat per la Unió Europea dicta una sèrie de criteris que els Estats membres hauran de determinar en les lleis que creïn per atorgar aquestes autoritzacions, que són:

- Seguretat i protecció de les xarxes i instal·lacions elèctriques i dels equips associats.
- Protecció de la salut i seguretat públiques
- Protecció del medi ambient
- Ordenació del territori i la selecció dels emplaçaments
- La utilització del sòl públic
- L'eficiència energètica
- La naturalesa de les fonts primàries
- Les característiques particulars del sol·licitant, com ara les capacitats tècniques, econòmiques i financeres.
- Es demana una contribució de les instal·lacions de generació per tal de complir l'objectiu comunitari general d'arribar a una quota de mínim un 20% d'energia procedent de fonts d'energia renovables en el consum final brut de l'energia de la Comunitat pel 2020.
- Es demana una contribució en la reducció d'emissions per part de les instal·lacions generadores d'electricitat.

Vist que no ens interessa aprofundir massa en l'estudi de cadascuna d'aquestes condicions, perquè com s'ha explicat anteriorment l'objectiu d'aquest estudi no és detallar minuciosament totes les lleis implicades en la implementació d'una central generadora d'alta potència, sinó que és valorar les normatives més importants, a continuació es mostren aquestes lleis més representatives referents al marc competencial espanyol referent al tema tractat.

L'atorgament de l'autorització per tal d'instal·lar una central geotèrmica dintre del territori espanyol segueix els procediments descrits a la Llei vigent que a dia d'avui segueix regulant la majoria d'aspectes relacionats amb la producció, distribució, transformació i altres processos de l'electricitat; que és la Llei 24/2013 del 26 de desembre o també coneguda com a Llei del Sector Elèctric (LSE). Les autoritzacions administratives més importants són les referents als tres àmbits següents:

- Àmbit energètic
- Àmbit territorial
- Àmbit mediambiental

A continuació s'analitza breument la normativa associada en aquests tres àmbits i a l'obtenció de documents bàsics com el procediment de permís d'accés i el de connexió a xarxa.

### 6.1.1. Àmbit energètic

La LSE (recordar que es refereix a la Llei 24/2013) especifica en quant l'àmbit energètic que si la central productora té una potència elèctrica instal·lada igual o menor a 50 MW (com és el cas de l'exemple realitzat en aquest projecte), aquest àmbit passa a ser competència de la Comunitat Autònoma on es troba, en aquest cas Catalunya. A part de la potència instal·lada, un altre aspecte important a tenir en compte de la LSE és la classificació de la central, vist que afectarà a altres normatives aplicables en tots els àmbits inclosos l'energètic, i la geotèrmica no està considerada en cap classificació com a central d'alta potència al no existir-ne cap a Espanya. Igualment, al ser una central renovable es considera que estarà regulada per les centrals de règim especial (eòlica, solar, hidràulica, tractament de residus, biomassa i cogeneració).

D'aquesta forma, s'ha de realitzar una inscripció de la central al Registre d'instal·lacions de producció d'energia elèctrica a Catalunya per poder obtenir la condició d'instal·lació de producció d'energia elèctrica. El Real Decret (RD) 308/1996 estableix els procediments administratius per dur a terme aquest Registre. Abans de registra-se, però, cal demanar la condició que reconeix la central com a una instal·lació de producció d'energia elèctrica en règim especial, resumida en dos passos:

- A) Formar part de qualsevol dels grups trobats a l'article 2 del RD 2366/1994: Es compleix al ser una central que s'alimenta amb una font renovable.
- B) Obtenir la condició d'instal·lació de producció d'energia elèctrica en règim especial com dicta l'article 4 del RD 308/1996. Aquest article 4 especifica el format i el mètode d'elaboració de la sol·licitud que sempre es dirigiria al director general d'Energia i presentar-la a qualsevulla delegació territorial d'Indústria, Comerç i Turisme amb el contingut que es s'esmenta a l'article 70 de la Llei 30/1992 del 26 de novembre.

Seguint ara sí amb la inscripció al Registre d'instal·lacions de producció d'energia elèctrica en règim especial, s'ha de sol·licitar en menys d'un any des de que es demana l'atorgament de la condició de la central com a instal·lació productora en règim especial la sol·licitud d'inscripció al Registre. Normalment es sol·liciten les dues alhora. El RD 2366/2014 del 9 de desembre explica les condicions amb les que s'ha de presentar la sol·licitud de Registre, amb especial interès per la informació especificada a l'article 6.5 d'aquest Real Decret sobre els resums anuals dels titulars de la central sobre l'activitat realitzada els anys anteriors i l'article 11 que dicta com s'ha de presentar al Registre la còpia del contracte amb l'empresa elèctrica de distribució i transport a la que es connecta la xarxa de la qual es connecta la central. L'article 8 del propi RD 2366/2014 explica què s'hauria de fer en cas de voler canviar el tipus de inscripció al Registre.

Sense entrar en detall del format amb que cal presentar tots els documents, es presenten les sol·licituds que manquen a la Direcció General d'Energia del Departament d'Indústria, Comerç i

Turisme. D'aquesta forma, a continuació es mostren quines són aquestes sol·licituds bàsiques que calen per acabar amb la normativa referent a l'àmbit energètic.

- Sol·licitud per l'autorització administrativa prèvia a la instal·lació
- Acta de posada en servei de la central
- Un cop registrada com a condició i al Registre d'instal·lacions de producció d'energia elèctrica en règim especial, es sol·licita l'entrada al Registre d'establiments industrials segons el que disposen els articles 3 i 22 de la Llei 21/1992 del 16 de juliol.

Un cop acceptats tots els documents descrits anteriorment i atorgats els permisos necessaris (no s'han ficat tots, només els més importants), s'analitza d'Ordre del 2 de febrer de 1990 que estableix les normes de procediment per adaptar la implantació, reforma, ampliació, inspecció i manteniment d'instal·lacions d'alta tensió. A l'article 4 es parla sobre altres certificats com el certificat d'acabament d'obra i a l'article 6 les accions a seguir si es desitja modificar les condicions del subministrament d'alta tensió.

### **6.1.2. Àmbit territorial**

Els procediments administratius d'àmbit territorial són, com en el cas anterior on es valoraven els d'àmbit energètic, competència de cada Comunitat Autònoma (motiu pel qual cal veure la regulació a Catalunya tenint en compte l'anàlisi d'exemple i irreal que s'està realitzant per una central productora de potència menor o igual a 50 MW dintre del seu territori). Com s'ha dit anteriorment s'està realitzant aquest exemple perquè no s'ha definit una ubicació real en el projecte realitzat, i per tant és una forma de veure quines normatives estatals i/o autonòmiques es podries aplicar.

Prosseguint amb el fil conductor inicial, si la central volcànica s'emplaça a Catalunya és la Llei de Política Territorial de Catalunya 23/1983 del 21 de novembre la que regula aquest àmbit, vist que "estableix les directrius de l'ordenació del territori català i d'aquelles accions administratives amb incidència territorial a Catalunya" segons explica la mateixa Llei.

Aprofundint una mica més, s'hauria de cercar a la Llei 1/1995 del 16 de març que aprova el Pla Territorial General de Catalunya a quin àmbit correspon el municipi on es troba la central segons les divisions territorials limitades en el mateix document (per exemple, Lleida correspon a l'àmbit de Ponent). Un cop situada la central geogràficament, cal situar-la segons les classificacions de sòls urbans recollides a la Llei 1/2010 coneguda com la Llei d'Urbanisme de Catalunya 2010, que són els recollits a l'article 25 d'aquesta:

- Sòl urbà.
- Sòl no urbanitzable.

- Sòl urbanitzable.

Al tractar-se d'una central que aprofita la calor provinent d'un vulcanisme actiu emmagatzemada en una cambra magmàtica, el terreny seria de sòl no urbanitzable. L'apartat 4 de l'article 47 de la Llei d'Urbanisme de Catalunya 2010 determina que un sòl no urbanitzable pot ser destinat a la producció d'electricitat a partir mitjançant una central alimentada amb una font renovable.

Si es volgués portar endavant la construcció de la central, caldria consultar el Real Decret 64/2014 per veure si és necessària l'aprovació d'un pla urbanístic (article 46) o la d'un projecte d'actuació específica (article 47). Al ser sòl no urbanitzable, s'aplicaria l'article 47 d'aquesta Llei i es cercaria l'activitat realitzada a l'apartat 4. La central geotèrmica d'alta potència no apareix entre les centrals tractades vist que no n'hi ha cap, així que es tractarà com si fos una altre central renovable de les que es troben a l'article 47.4.

Un cop es sap que la central està reconeguda com a possible activitat, es segueix el procediment descrit a l'article 48 de la Llei d'Urbanisme de Catalunya 2010 amb les competències associades a l'Ajuntament del municipi en qüestió (més detallades al RD 64/2014). Finalment, es demanen els diferents permisos urbanístics en aquest ordre:

- Aprovació prèvia: Seguint el procediment descrit a l'article 55 de la Llei d'Urbanisme de Catalunya 2010 .
- Aprovació definitiva: Seguint el procediment descrit a l'article 56 de la Llei d'Urbanisme de Catalunya 2010 .
- Llicència urbanística: Es demana un cop es té un projecte d'actuació específica aprovat com s'explica a l'article 56 de la Llei d'Urbanisme de Catalunya 2010 . Els detalls de la sol·licitud es troben a l'article 57 de la mateixa Llei.

Un cop acabats els tràmits, les autoritats competents informaran als titulars de la central si els permisos han sigut acceptats i els donaran amb la condició que es segueixin les normes recollides a l'article 64 de la Llei d'Urbanisme de Catalunya 2010 per preservar el sòl i integrar la central al medi natural que la envolta.

### 6.1.3. Àmbit mediambiental

Com en els dos casos anteriors, l'àmbit ambiental per una central generadora d'energia elèctrica amb potència instal·lada menor o igual a 50 MW és competència de la Comunitat Autònoma on s'ubica. Els diferents processos administratius són recollits en aquest cas a la Llei 20/2009 del 4 de desembre que tracta el sistema d'intervenció administrativa de les activitats amb incidència ambiental per totes les activitats de titularitat pública o privada emplaçades a Catalunya, i pretén:

- Prevenir la contaminació aplicant les mesures tècniques adequades
- Prevenir la transferència de la contaminació d'un medi a un altre
- Prevenir accidents greus
- Reduir l'impacte ambiental
- Reduir la producció de residus utilitzant tècniques de minimització i una gestió correcta.

La infraestructura en qüestió, en aquest cas la central geotèrmica de tipus volcànic, haurà de complir aquestes condicions un cop posada en marxa. Tanmateix, abans de la seva construcció cal la llicència ambiental corresponent que es troba definida a l'article 7 de la Llei 20/2009 esmentada anteriorment. Els tràmits a realitzar es defineixen a l'article 37 i a l'article 38 es defineix quin serà l'òrgan encarregat de donar la llicència en funció de varis factors com la població que habita al municipi on s'ubica la central (si és major a 20000 serà el propi Ajuntament del municipi i en cas contrari l'òrgan serà designat per la Ponència Ambiental de la Generalitat).

Un cop designat òrgan, cal veure la documentació a presentar per sol·licitar la llicència, que es presenta a l'article 39. Aquest mateix article dicta que és necessari demanar l'informe urbanístic a l'òrgan que pertorqui, explicat a l'article 60. Si aquest informe és desfavorable, caldrà parar tot el procés administratiu immediatament i la construcció en cas que s'hagués començat a construir sense la tramitació finalitzada. Com s'ha vist anteriorment, es tracta de sol no urbanitzable, i si ja s'ha concedit aquesta les llicències tractades a l'àmbit territorial l'informa urbanístic no serà desfavorable.

Cal verificar formalment que el projecte consta d'un estudi ambiental, com es remarca a l'article 40. D'aquesta forma s'envien els resultats amb la sol·licitud de la llicència ambiental, i com diu l'article 41, la informació es farà pública. Als articles 45 i 46 es tracta la proposta de resolució provisional i l'audiència de les parts interessades. Seguint els protocols descrits en aquest i a l'article 49 pel que fa la resolució provisional així com els dels dos articles esmentats anteriorment, l'òrgan que s'encerrega del cas en qüestió (l'Ajuntament per exemple) tanca el procés de sol·licitud i dona la resolució en menys de sis mesos (articles 47 i 48).

Aquesta llicència ambiental es pot tramitar al mateix temps que les anteriors, sempre i quant es compleixin els requisits que es troben als diferents articles de les diferents lleis tractades al llarg d'aquest estudi.

#### **6.1.4. Accés i connexió a xarxa**

Els últims dos permisos que cal necessàriament tenir en compte quan es parla de construir una central generadora d'electricitat, són aquells que fan referència al propi subministrament d'electricitat a la xarxa elèctrica de distribució. En aquest cas són competència de l'Estat Espanyol i no de la Comunitat Autònoma. La pròpia Llei del Sector Elèctric 24/2013 del 26 de desembre contempla

a l'article 33 els permisos d'accés i de connexió a la xarxa, explicant a qui afecta i quins organismes són els encarregats de atorgar-los. Com s'observa al mateix article:

- El permís d'accés a la xarxa el concedeix el gestor de la xarxa de distribució de la zona.
- El permís de connexió a la xarxa el dona l'empresa distribuïdora titular de la xarxa en que es troba el punt pel qual es sol·licita el permís.

Les condicions a complir es defineixen al mateix article 33 de la LSE. En quant als procediments d'accés i connexió a la xarxa es defineixen a l'annex XV del RD 413/2014 del 6 de juny i les condicions d'operació per una central renovable el RD 1955/2000 del 1 de desembre. Aquest últim Real Decret, de fet, regula els procediments d'autorització d'instal·lacions productores d'energia elèctrica.

Conseqüentment, tant el procediment per demanar el permís d'accés com el procediment per demanar el permís de connexió a la xarxa estan recollits al RD 1955/2000. Els articles 39, 60, 62, 64, 66 i 66 bis són els més importants en quant la descripció de com s'ha de presentar i com es resoldrà la sol·licitud 'accés a la xarxa elèctrica. En cas que hi hagués algun conflicte amb els termes exposats en els anteriors articles caldria la mediació de la "Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia" com dicta l'article 33.3 de la Llei del Sector Elèctric 24/2013.

Per altre banda, un cop es té el permís d'accés es pot sol·licitar el de connexió a la xarxa com es desenvolupa a l'article 66 del RD 1955/2000. Els criteris d'afectació a la xarxa estan definits a l'article 63.a del mateix document per centrals amb potència instal·lada superior a 50 MW (que no és el cas) i al 63.b les restriccions de l'empresa de distribució. Finalment, s'observa a l'article 33.4 de la LSE que el permís de connexió únicament pot ser denegat per impossibilitats tècniques, qüestions de seguretat de les persones, per no existir la pròpia xarxa on es demana el punt de connexió, per manca d'espai físic suficient per ubicar les instal·lacions requerides per connectar la central o per no estar contemplat en la planificació vigent de la xarxa de transport o els plans d'inversió aprovats per l'Administració General de l'Estat.

Un cop obtinguts els documents tractats en els àmbits energètic, territorial i mediambiental i els d'accés i connexió a la xarxa (entre d'altres que no s'han esmentat vist que no són els més representatius) la central es pot construir i quan estigui en funcionament vendre l'electricitat amb les modalitats retributives que es recullen a la LSE 24/2013.

## 6.2. Normatives associades a l'estudi de mercat

Quan es tracta de retribuir-se mitjançant una activitat recollida dintre de la Llei del Sector Elèctric el primer pas és veure si la teva condició està recollida dintre del seu àmbit d'aplicació i posteriorment

les condicions regulades pel propi document. Suposant que l'estudi d'implementació de la central geotèrmica del tipus volcànic ha sigut satisfactori en el cas irreal on es situa a Catalunya (com s'ha vist en els apartats anteriors), i s'obtenen tots els permisos necessaris per dur a terme la construcció i la posada en marxa connectant-la a la xarxa de distribució d'energia elèctrica subministrant-li electricitat, cal veure com el propietari de la central pot retribuir-se econòmicament. És evident que quan es fa una infraestructura amb una despesa de capital econòmic tant elevada com la requerida per una central generadora, els titulars de l'activitat pretenen recordar la inversió i vendre l'energia que generen. Doncs ve, realitzar aquesta venda segueix un procés i s'ha de fer d'una forma que està regulada per les normatives de l'Estat.

En la Llei 24/2013 (LSE) estan recollits tots els drets (article 26.1) i tots els deures (article 26.3) que té un productor d'energia elèctrica tal com es reconeix a l'article 6.1. D'aquesta forma, l'activitat queda reconeguda i dintre de l'àmbit d'aplicació de la Llei. Entre tots els drets que tenen els productors d'electricitat, n'hi ha un que és interessant i que és la base d'aquest estudi, i és el dret a la retribució de l'activitat de producció (article 26.1.e). D'aquesta forma, en aquest estudi de mercat es veuen breument quines són les modalitats retributives que entren en les normatives de venda d'energia elèctrica. Es descarta ja d'entrada l'autoconsum (explicat a l'article 9 de la LSE i més a fons al RD 900/2015), per comentar les retribucions de l'activitat de la producció d'electricitat. Així que els conceptes retributius estan recollits a l'article 14.5 de la LSE i són:

- La retribució al mercat energètic: Introduïda a l'article 14.5.a
- La retribució mitjançant els serveis d'ajust del sistema: Introduïda a l'article 14.5.b
- La retribució per mecanismes de capacitat: Introduïda a l'article 14.5.c
- La retribució específica: Introduïda a l'article 14.4.e i l'article 14.7.

A continuació s'analitza breument a quines es podria acollir el titular de la central amb tota seguretat, quines queden directament descartades i quines depenen de la situació.

### **6.2.1. Concepte retributiu del Mercat Energètic**

El primer concepte retributiu presentat a la LSE pels productors d'energia elèctrica està a l'article 14.5.a i és la retribució per la venda de l'energia elèctrica generada a la central al mercat energètic (compost alhora pel mercat diari i el mercat interdiari). Vist que els períodes de cassació duts a terme per l'operador de mercat per establir un preu segons les ofertes energètiques disponibles no és competència de la pròpia central, sinó que depèn de molts altres factors, s'analitza únicament si aquesta es pot retribuir amb aquest règim retributiu o no sense a entrar a valorar les normatives que regulen el mercat energètic.

L'article 23.1 de la Llei 24/2013 especifica que no només és una opció sinó que presentar ofertes econòmiques de venda d'energia al mercat diari o interdiari és obligatori per tots els productors d'energia elèctrica. De fet s'ha de fer ofertes a través de l'operador de mercat per totes les unitats de producció d'energia elèctrica que disposi el titular d'aquestes (amb l'excepció de disposar d'algun contracte bilateral).

El RD 413/2014 remarca més aquesta obligatorietat de presentar ofertes a l'article 9 (Títol III) referent a la participació en el mercat, junt al fet que la regulació de les ofertes estan regulades a l'annex IV. D'aquesta forma queda clar que el mètode retributiu per participació en el mercat energètic serà la forma que segons el preu establert en el període de cassació del mercat diari el propietari de la central guanyarà diners venent l'energia elèctrica.

### 6.2.2. Concepte retributiu mitjançant el serveis d'ajust del sistema

Es desenvolupa aquesta modalitat retributiva introduïda a l'article 14.5.b de la LSE al RD 413/2014 per centrals amb una potència instal·lada major a 10 MW. A l'article 10.2 d'aquest Real Decret estipula les normatives per beneficiar-se d'aquesta retribució, que es farà via resolució. També s'esmenta que podran participar a la fase II de Restriccions Tècniques i optar al cobrament d'aquest diners les centrals de nova creació amb un coeficient de disponibilitat superior al 50 % o inferior al 50 % però que passin unes proves de participació en serveis de regulació terciària (portades per l'operador del sistema). Les centrals que ja participaven anteriorment no se'ls aplica les noves restriccions. La Figura 6.1 mostra les diferents tasses de disponibilitat aproximades per diferents tecnologies.

	% Disponibilidad
<i>Tecnología</i>	
Nuclear	87
Hulla+antracita	90
Lignito negro	89
Carbón de importación	94
Fuel-gas	75
Ciclo combinado	93
Bombeo	73
Hidráulica convencional	59
<i>Instalaciones con régimen retributivo específico</i>	
Hidráulica	29
Biomasa	45
Eólica	22
R.S. Industriales	52
R.S. Urbanos	48
Solar	11
Calor Residual	29
Carbón	90
Fuel-Gasoil	26
Gas de Refinería	22
Gas Natural	39

**Figura 6.1.** Tasses de disponibilitat per diferents tipus de centrals elèctriques. (Font: Ordre IET/2735/2015 del 17 de desembre a la disposició transitòria de l'apart 2).



Com es pot observar a la Figura 6.1 la central geotèrmica no apareix. Tanmateix es recomanaria realitzar les proves vist que la font energètica subministra energia de manera gairebé constant i permet produir sempre la mateixa potència sense importar el moment del dia, convertint-se en gairebé una central base; en cas de ser així s'ha d'esperar una taxa de disponibilitat alta i notablement superior al 50 %. D'aquesta forma les normatives esmentades anteriorment regulen la retribució mitjançant els sistemes d'ajut.

### **6.2.3. Concepte retributiu per mecanismes de capacitat**

Aquest concepte retributiu presentat a l'article 14.5.c de la LSE es troba explicat més extensament a l'Ordre ITC/3127/2011 i especifica al mateix àmbit d'aplicació trobat a l'article 2 d'aquesta ordre que tracta el mètode retributiu, que únicament es podran acollir instal·lacions tèrmiques de producció d'energia elèctrica basades en fuel-oil, de cicle combinat i de carbó o bé centrals hidràuliques de bombeig pur, bombeig mixt o embassament. Les centrals geotèrmiques no estan contemplades i per tant cal la retribució mitjançant mecanismes de capacitat no és possible.

### **6.2.4. Concepte retributiu específic**

Aquest concepte retributiu presentat a l'article 14.5.e de la LSE està regulat més àmpliament al RD 413/2014. La central geotèrmica està dintre de l'àmbit d'aplicació de la retribució específica perquè s'aplica a centrals basades en fonts renovables i centrals de cogeneració. A l'article 11.3 s'especifica que s'empra un sistema de concurrència competitiva per atorgar aquesta retribució, i a l'article 11.9 les condicions amb les que s'han de trobar els equips de la central que vol retribuir-se d'aquesta forma.

La concurrència competitiva s'anunciarà via Real Decret per part del Govern com es diu a l'article 12.2 del RD 413/2014, però en els últims dos anys hi ha hagut només dues crides (RD 947/2015 del 16 d'octubre i IET/1045/2014 del 16 de juny. Per aquest motiu no està clar si la central es podria acollir a aquesta modalitat retributiva, però es recomana participar en el procés de selecció i esperar a que es faci alguna crida passat el procés de concurrència competitiva.

Aquests són els mètodes d'obtenir benefici amb la venda d'electricitat i l'activitat de producció d'energia elèctrica a la central geotèrmica, i per tant la normativa aplicable més interessant a quant a modalitats de retribució es refereix. Es considera que els estudis d'implementació i de mercat són els més interessants en quant a normatives aplicables al projecte realitzat pels motius exposats al principi d'aquest apartat del treball.



## 7. Anàlisi de l'impacte ambiental

En aquest apartat es valoren quins són els aspectes beneficiaris i perjudicials de la implementació d'una central geotèrmica del tipus volcànic com la plantejada en aquest projecte pel medi ambient. El primer anàlisi que cal realitzar és què pot aportar una central d'alta potència basada en una font renovable respecte altres tipus d'instal·lacions generadores d'energia elèctrica. Posteriorment, s'estudiaran altres consideracions com quin impacte pot tenir la central volcànica sobre l'entorn on aquesta es construeix i les possibles conseqüències a curt o llarg termini del seu funcionament normal o d'una possible averia o accident.

### 7.1. Impacte ambiental en la generació elèctrica

En quant la generació elèctrica es refereix, que al cap i a la fi és l'objectiu bàsic d'aquest estudi i de la construcció d'una central generadora sigui del tipus que sigui, canvia molt l'impacte que té aquesta sobre el medi ambient depenent del tipus de font energètica que faci servir. És evident, que hi ha molt impactes que poden derivar de l'activitat de producció elèctrica duta a terme en una instal·lació de generació d'electricitat a part del propi impacte derivat d'emissions a l'atmosfera. Per exemple, una central hidràulica no genera emissions de CO<sub>2</sub> al produir energia elèctrica però per contrapartida requereix la desforestació de les zones properes, la desestabilització del caudal natural d'aigua del riu i fins i tot pot posar en perill la vida d'animals autòctons de la zona on s'implementa.

Malgrat la informació anterior, l'impacte que primer cal analitzar pels seus efectes directes sobre el canvi climàtic i l'escalfament global és precisament el que fa referència a les emissions de gasos d'efecte hivernacle derivades de la pròpia activitat normal de la central. Com és lògic, les centrals geotèrmiques es caracteritzen per no emetre cap emissió de CO<sub>2</sub> ni de cap altre tipus de gas d'efecte hivernacle en el procés de generació d'electricitat (en aquest apartat no es valoren les emissions que hi ha hagut per construir la pròpia central i els components que la componen).

Analitzant breument el procediment d'obtenció de l'energia que posteriorment i mitjançant diverses transformacions acaba convertint-se en electricitat, s'observa que en cap moment ha calgut l'aportació de la crema de cap combustible fòssil o s'ha realitzat alguna acció contaminant; l'únic que s'ha fet és aprofitar energia emmagatzemada en una cambra magmàtica en forma de calor i captar-la gràcies a uns tubs de captació que aprofiten l'alta temperatura de la roca en contacte amb la cambra degut a la conducció que realitza la pròpia roca amb aquesta. Els següents passos són intercanvis de calor senzills com la convecció entre l'aigua del cicle primari i el tub per escalfar-la i que aquesta pugui escalfar l'aigua d'un cicle secundari en el seu pas per generador de vapor i el reescalfador. D'aquesta forma, aquesta aigua calenta del cicle secundari o de Rankine permet el gir de les turbines

per acabar produint electricitat. En tot aquest procés l'emissió de CO<sub>2</sub> de la central és de 0 tones/kWh.

Al ser una central d'aproximadament 50 MW (49,35 MW); s'analitza a continuació quin impacte positiu tindrà la central volcànica sobre el medi ambient respecte una central de carbó i una central de cicle combinat de la mateixa potència instal·lada operant durant un any. Les emissions que aquestes dues centrals produiran són les que es poden estalviar amb la posada en marxa de qualsevulla central renovable d'emissió zero. A continuació es cerquen els valors estimats per "Climate Change 2014, IPCC" (52) , de les emissions de CO<sub>2</sub> per les centrals de carbó (820 gCO<sub>2</sub>eq/kWh) i per les centrals de gas natural de cicle combinat (490gCO<sub>2</sub>eq/kWh) –s'han agafat les "Lifecycle Emissions" vist que representen més adequadament les emissions emeses que únicament les directes, una mica més baixes. Les unitats estan ja dimensionades per kWh elèctric equivalent produït a la central, tenint en compte el propi rendiment d'aquesta.

Considerant que les centrals operen un temps equivalent a 300 dies a l'any, per exemple, les emissions que produiria cadascuna seria de:

- Central de carbó de 50 MW operant 300 dies a l'any:  $2,952 \cdot 10^8$  kgCO<sub>2</sub>eq/any
- Central de cicle combinat de 50 MW operant 300 dies a l'any:  $1,764 \cdot 10^8$  kgCO<sub>2</sub>eq/any

D'aquesta forma queda clar que en quant a emissions de diòxid de carboni es refereix, la central volcànica suposa un efecte molt positiu al medi ambient en comparació a centrals basades amb combustibles fòssils molt esteses com són les de carbó o les de cicle combinat. A part, s'ha realitzat l'estudi de forma que el subsòl no es saturés i refredés a ritme més ràpid que el de transmissió de calor per conducció per part de la cambra magmàtica. Per aquest motiu, la central podria estar operativa durant tot l'any i sempre s'estarien produint unes emissions de CO<sub>2</sub> negligibles en la producció d'electricitat.

Mentre es genera energia elèctrica es considera que la central es troba en condicions normals de funcionament, docs bé, es pot també analitzar si pot tenir altres impactes en aquesta fase. La generació elèctrica té associada una captació energètica mitjançant la instal·lació de 454 tubs en U per alimentar els 49,35 MW elèctrics que es produeixen en la central d'exemple dimensionada. Gràcies al model realitzat amb COMSOL Multiphysics® és possible veure que la base rocosa que s'apropa al tub en U augmenta de temperatura a mesura que en apropen en aquest. Tanmateix, deixant una distància mínima de 100 m entre pous ens assegurem que el terreny pot restituir l'energia extreta de la cambra magmàtica si es considera l'entorn definit amb les característiques i assumpcions concretes realitzades en aquest projecte. En altres paraules, els resultats indiquen que l'efecte sobre el terreny es nota únicament en una davallada de temperatura en els metres més propers als tubs de captació però permeten el flux normal de calor entre la cambra magmàtica i la

base rocosa que l'envolta, no hi ha efectes perjudicials sobre l'ambient evidents. El subsòl no es veu molt afectat i menys a la superfície, que únicament deixarà de rebre una petita part de calor que haurà sigut absorbida pels sistemes de captació.

Sí que es pot trobar un efecte directe de l'activitat de producció d'energia elèctrica que és l'abocament d'aire amb una alta humitat relativa i una temperatura elevada que surt de les torres de refrigeració. Aquest podria suposar un perill per animals volador que travessessin aquest aire-vapor a una temperatura teòricament més elevada a la de l'aire atmosfèric. De la mateixa forma, especialment en mesos freds pujarà lleugerament la temperatura de l'aire en contacte amb aquest, però alhora es difuminarà aquest efecte per la pròpia convecció realitzada amb altres fluxos d'aire. D'aquesta forma es pot dir que la generació elèctrica té un impacte mínim sobre el medi ambient, motiu pel qual es considera l'energia geotèrmica una bona font d'energia renovable per fer front als efectes del canvi climàtic en les zones on les característiques del terreny ho permetin.

## 7.2. Impacte ambiental en la instal·lació de la central

A continuació cal analitzar quin serà l'impacte ambiental que tindria la central si fos construïda en una ubicació real. Òbviament aquest impacte variarà segons les condicions específiques del lloc on es troba, i vist que no s'ha triat un emplaçament concret del qual es puguin estudiar els efectes directes sobre l'entorn on es situa, es realitza un anàlisi genèric amb els impactes més directes.

El primer que un es troba és la desforestació que s'hauria de donar si la central s'hagués de construir en una zona poblada per arbres i/o altres espècies. Aquest fet no ocorreria en zones on no les últimes erupcions volcàniques no han donat oportunitat a créixer vegetació als voltant; zones que es tractarien d'evitar per la construcció de la central pel propi risc d'erupció volcànica si aquestes són massa freqüents. Tanmateix, les zones volcàniques resulten ser molt fèrtils i per tant probables per tenir vegetació en la seva superfície. Si és el cas, caldria alliberar l'espai que ocupa la central i els pous de captació. Seria necessari també talar els arbres que impedeixin la col·locació dels equips necessaris per la perforació dels pous (generadors d'aire comprimit, les diferents broques de perforació, tancs d'emmagatzematge del ciment i del fang de perforació...). En quant l'espai de la central no serà petit vist que requereix de torre de refrigeració i d'espai per instal·lar els sistemes de turbinat i els diferents bescanviadors de calor. Malgrat això, aquest és un inconvenient que tenen totes les centrals elèctriques d'alta potència, que ocupen bastant espai i és necessari talar la vegetació de les zones on es troben en cas que sigui necessari.

Un altre impacte negatiu sobre el medi ambient quan es tracta de la instal·lació de la central és la contaminació ambiental que es genera en els processos industrials requerits per fabricar els components que componen la central així com la contaminació associada a la pròpia construcció.

L'obtenció de l'acer necessari per la infraestructura de la central, la gran quantitat de formigó requerida per les torres de refrigeració i els propis components com turbines, tubs i bescanviadors deriva de processos contaminants. Tot i que s'està treballant per reduir les emissions en la fabricació de molts productes resultats de processos industrials, encara a dia d'avui s'ha de tenir en compte un impacte negatiu que en deriva en forma d'emissions de CO<sub>2</sub> i altres gasos d'efecte hivernacle.

Un altre aspecte a valorar però que és independent a la pròpia central, és d'on prové l'electricitat necessària per fer moure totes les perforadores i els altres equips de construcció que requereixen de molta energia pel seu funcionament. Si l'energia prové de fonts renovables, l'impacte atmosfèric que té emprar aquesta maquinària no és negatiu. Per altre banda, si l'energia prové de fonts com el carbó, el gas natural o la crema d'altres combustibles fòssils cal valorar les emissions de CO<sub>2</sub> associades a la producció de l'energia que alimenta aquest equips. En el cas que provingui de centrals nuclears, els efectes d'emissions de gasos d'efecte hivernacle es redueixen considerablement però es substitueixen per l'aparició de residus radioactius. Com s'ha dit, no és un impacte ambiental derivat de la pròpia central ni tampoc molt gran vist que només duraria el temps que es consumís energia per fer moure aquesta maquinària de construcció; però és necessari tenir-lo en compte vist que les quantitats energètiques que es necessiten cobrir seran bastant grans.

Aquests són segurament els impactes més important a valorar en el procés de instal·lació de la central. Es podrien estudiar els efectes de la perforació en les etapes que aquesta es du a terme, però no s'han trobat referències que demostrin que la perforació de pous (d'extracció de petroli o gas natural, en centrals geotèrmiques ja existents...) tinguin un impacte clarament negatiu sobre el terreny ni el medi on es realitzen. Tanmateix, vist que un error en la seva perforació podria ser fatal, a continuació es tracten els impactes ambientals que podrien derivar d'accidents o averies de la central.

### 7.3. Impacte ambiental per possibles averies i accidents

És evident que el fet de tractar amb cambres magmàtiques amb magma calent i a alta pressió, generalment associades a àrees amb vulcanisme actiu, faci imprescindible el control de les mesures de seguretat preses durant la construcció de la central i durant el seu funcionament normal un cop estigui connectada a la xarxa i operativa. No controlar les accions o estudiar el terreny a la perfecció podria suposar un desastre natural causat per accions humanes amb importants repercussions negatives sobre l'entorn que rodeja a la central.

Analitza-ho per passos, el primer accident possible existeix en la fase de perforació dels pous. A mesura que es perfora la temperatura de la roca augmenta així com la seva pressió, doncs bé, a la cambra magmàtica hi ha roca fosa a alta pressió que en cas d'arribar a ella sortiria per les pròpies lleis

de la física a l'obri-se una esquerda a diferent pressió impulsada vers la superfície. Per tant, és necessari fer un estudi topogràfic acurat per saber amb precisió a quina distància està la cambra magmàtica del punt on es troba la perforadora. Aquesta màquina, ha de perforar fins la profunditat delimitada per la distància de seguretat mínima de la que s'ha parlat en anteriors apartats del projecte, de forma que s'eviti qualsevol accident. Com ja s'ha dit, un accident d'aquest tipus podria suposar la destrucció de l'entorn de la central a mode d'erupció volcànica provocada pel propi error humà, i s'ha de vigilar molt en no interferir amb la pròpia activitat estàndard de les reserves de magma de subsòl.

En la fase de construcció aquest és l'accident més greu que cal controlar i evitar (tampoc resulta molt difícil, simplement amb les mesures esmentades d'estudiar exhaustivament el terreny i supervisar la maquinària perquè el límit a perforar fins la profunditat programada és suficient). A més, el material de perforació a dia d'avui és molt precís. En quant a altres problemes o averies un cop està construïda la central, tots són fàcils de controlar sempre que la pròpia central compleixi amb les mesures de seguretat establertes per la pròpia llei que la regula i es fa un bon manteniment dels equips i components d'aquesta.

Si algun element del sistema d'una central falla, ja estan dissenyades totes les mesures de seguretat necessàries per evitar possibles danys materials o al medi ambient. Per exemple, si hi hagués una sobretensió al generador síncron acoblat a la turbina el sistema elèctric de la central deixaria d'enviar electricitat a la xarxa bloquejant-se i evitant qualsevol risc. D'aquesta forma, es pararia el propi generador perquè es pogués trobar l'error i reparar-lo. El mateix succeeix amb els altres components de la central, tots estan estrictament regulats i a prova de d'errors.

Tampoc es considera necessari aprofundir massa en les diferents averies que pot tenir una central, ja que únicament interessa valorar aquelles que tinguin un impacte negatiu sobre el medi ambient. Es podria pensar que podrien aparèixer més d'aquests riscos que podrien afectar sobre l'entorn de la central a la part de captació energètica, al subsòl. Tanmateix, es considera que un cop construïts el seu funcionament continuat mitjançant el pas d'aigua de captació per ser escalfada no té cap efecte perjudicial sobre el terreny on es troba. De totes maneres, aquest resultat són els obtinguts amb les assumpcions realitzades per fer les simulacions realitzades en aquest projecte, caldria realitzar estudis en la realitat per poder assegurar que l'afirmació anterior és certa.





## Conclusions

A continuació s'esmenten les conclusions conseqüents a la finalització d'aquest Treball de Final de Grau. Es divideixen en conclusions personals i en conclusions del propi projecte desenvolupat en aquest informe.

### Conclusions personals

A nivell personal, el desenvolupament d'aquest projecte sobre una central geotèrmica del tipus volcànic ha sigut molt satisfactori en quant a l'aplicabilitat d'habilitats i coneixements adquirits al llarg dels quatre anys que he cursat aquest Grau en Enginyeria de l'Energia.

No només he pogut aplicar aquests coneixements, sinó que he tingut l'oportunitat d'indagar de forma profunda en la temàtica d'un sector molt interessant com és l'obtenció d'energia a partir de l'energia emmagatzemada al subsòl, en aquest cas una cambra magmàtica: Adquirint, d'aquesta forma, un ampli ventall de coneixements nous especialment en l'àmbit de la geologia i la transferència de calor en sistemes d'alta entalpia amb un model de captació variable en funció de les característiques del terreny.

A part de coneixements merament teòrics i d'implementació de models, cap destacar l'aprenentatge d'una nova eina informàtica com és el software COMSOL Multiphysics®.

### Conclusions del projecte

Es considera que s'ha complert amb els objectius que es van plantejar al principi d'aquest projecte. Tanmateix, els resultats que s'esperaven al principi sobretot en referència a la captació de calor mitjançant la tecnologia dels tubs en U han variat considerablement respecte el que es podia suposar abans de la realització de les simulacions amb COMSOL Multiphysics® i el tractament de dades obtingudes per dimensionar la central. Les conclusions més importants són:

- El paràmetre de la base rocosa sobre la que es construeix la central geotèrmica del tipus volcànic que més afecta al dimensionament de la central és la conductivitat tèrmica del terreny. Quan menor sigui aquesta magnitud, major serà la distància necessària que caldria deixar entre pous de captació (o tubs en U); vist que no complir amb aquesta distància mínima impediria extreure energia de la roca calenta de manera il·limitada al ser el ritme d'extracció de calor major al de reposició d'energia derivat de la conducció de calor que du a terme la roca amb la cambra magmàtica de forma natural.

- La superfície de captació necessària per instal·lar una central d'aproximadament 50 MW és molt gran precisament per la separació que cal deixar entre tubs de captació. Això implica que el limitador de la potència nominal de la central sigui la longitud de la cambra magmàtica disponible. Per tant, no és senzill trobar una cambra magmàtica de grans dimensions que a més estigui a una profunditat accessible amb les tecnologies de perforació existents. Per instal·lar una central com aquesta es requeriria un estudi exhaustiu de diferents zones volcàniques existents al planeta.
- Un cop trobat un emplaçament idoni per la central, que és l'aspecte més difícil degut a la manca de dades de perfils de temperatures del terreny en contacte amb una cambra magmàtica, i realitzat el model de captació, el dimensionament de la central és més aviat trivial. Com a central geotèrmica binària, els bescanviadors de calor emprats per transmetre l'energia captada a les turbines i per refrigerar el propi cicle de Rankine on aquestes es troben són els estàndards per qualsevulla central elèctrica que tingui aquest cicle tèrmic incorporat; així com la resta de components pel cicle secundari i pel cicle terciari.
- Finalment, les simulacions i el dimensionament de la central realitzats permeten concloure que és viable la construcció d'aquesta tecnologia basada en una font renovable i no contaminant, que pot substituir altres tipus d'instal·lacions de generació elèctrica perjudicials pel medi ambient en localitzacions amb presència d'activitat volcànica sota la superfície. Tanmateix, l'assoliment d'una alta potència nominal es veurà condicionat per les dues conclusions inicials.

## Pressupost

En aquest apartat es farà una valoració dels costos assumits per l'individu que ha realitzat aquest projecte tenint en compte dos casos: La primera situació correspon al cas d'un estudiant del Grau en Enginyeria de l'Energia que ha realitzat un Treball de Final de Carrera sobre l'estudi de viabilitat i el dimensionament bàsic d'una central geotèrmica del tipus volcànic. Per altre banda, es farà un estudi econòmic més elaborat sobre la hipotètica situació on aquest estudi ha dut a terme per un enginyer que treballa en una empresa (enginyeria) i que ha de cobrar als seus clients pels costos associats al propi treball realitzat.

Important: Tots els costos d'ambdós casos apareixen amb l'IVA del 21 % inclòs.

### 1. Cas 1

En aquest primer cas s'analitzen els costos associats a l'elaboració del projecte en la situació on aquest l'ha desenvolupat un estudiant que està en procés de realització del seu TFG (com és el cas real). És un anàlisi que serveix per veure com els costos els hauria d'assumir el propi estudiant perquè no és legal la venda d'un projecte sense tenir els permisos de treballador autònom que pertoquin o el contracte amb una empresa. No existeixen costos associats a l'enginyeria vist que només es tracta de l'estudiant, havent-hi únicament una valoració del temps emprat per l'alumne i dels materials (físics o informàtics) que aquest ha fet servir per desenvolupar el projecte.

#### 1.1. Costos de personal

Els costos associats al personal i les hores de feina dels propis treballadors recollits en els costos d'enginyeria són nuls quant els projectes són realitzats per estudiants; vist que legalment no es pot cobrar al client en aquestes condicions. Per aquest motiu a la **Taula 1** es multiplica el cost de les hores de treball de l'estudiant per 0 €/h.

Concepte	Nombre	Hores (h)	Preu/hora (€/h)	Total (€)
Treballadors	1	600	0	0
Total	-	-	-	0

**Taula 1.** Cost del personal que ha realitzat el projecte.

#### 1.2. Material

Per material s'entén tot allò que és necessari per desenvolupar el treball però que suposa un cost per obtenir-lo. A l'estar valorant el cas de l'estudiant, molts softwares o accessos a revistes o articles que

d'altra forma serien de pagament en aquest cas són gratuïts. La **Taula 2** mostra els costos dels diferents materials no gratuïts requerits per realitzar el projecte en 4 mesos, i el preu final que suposen per l'estudiant (negatiu si perd) i per l'hipotètic client que s'afavoreix de l'estudi realitzat.

Material físic requerit					
Component	Un. (u)	Preu/u (€/u)	Preu total (€)	Preu estud.(€)	Cost client (€)
Ordinador**	1	100	100	-100	0
Material informàtic requerit					
Component	Un. (u)	Preu/u (€/u)	Preu total (€)	Preu estud.(€)	Cost client (€)
Llicència Office (Excel, MSWord...)	1	10/mes	40	- 40	0
Llicència COMSOL Multiphysics®	1	1438,5/any	1438,5 (anual)	0*	0
Llicència Adobe	1	12,09/mes	48,36	0*	0
Accés bases de dades (IEEE, Engineering Village...)	-	-	400/any***	0*	0
Total	-	-	-	-222	0

**Taula 2.** Costos dels diversos materials requerits per dur a terme el projecte en 4 mesos.

(\*) Cost assumit per la universitat o llicències gratuïtes per estudiants.

(\*\*) El preu de original de l'ordinador és de 1200 €, tanmateix només s'ha de considerar el preu que representa aquest per l'estudi que s'està realitzant, considerant que té 4 anys (48 mesos) de vida i que s'ha emprat durant quatre mesos, el cost d'aquest ha de ser una  $4/48 = 1/12$  part del cost original. Per tant, 100 €.

(\*\*\*) Preu aproximat pel nombre de bases de dades consultades i els preus aproximats de les seves subscripcions.

### 1.3. Sumari

En aquest apartat es mostra la suma per acabar obtenint el cost total associat al desenvolupament del projecte en el cas 1. La **Taula 3** mostra els resultats.

Concepte	Cost per l'estudiant (€)	Cost pel client (€)
Cost personal	-	0
Cost material	-222	0
Total	-222	0

**Taula 3.** Sumari dels costos cas 1.

Veient els resultats, es pot concloure que si l'estudiant realitzés aquest projecte per alguna persona interessada l'hauria de fer sota la seva responsabilitat i sense ànim de lucre, sabent que hi haurà despeses que caldrà complir i que conrrar-li al beneficiat de l'estudi no seria en cap cas legal.

## 2. Cas 2

En aquest segon cas es planteja la situació on el realitzador del projecte ja és un enginyer graduat que treballa per una enginyeria d'un o varis membres; fet que no és transcendent en aquest estudi econòmic vist que es fa la consideració que el projecte només ha sigut realitzat per una persona. A continuació s'esmenten i es justifiquen les expenses bàsiques d'aquest projecte i que es cobraran al client per a qui es realitzaria aquest.

### 2.1. Costos d'enginyeria

En quan els costos d'enginyeria caldrà desglossar amb la part referent al personal i en quant als costos de la pròpia oficina, el funcionament i legalització de l'activitat realitzada i altres que es veuran a continuació.

#### 2.1.1. Costos de personal

Aquesta secció tracta el cost del personal que ha treballat en el projecte. A diferència del cas anterior on l'estudiant no es podria atribuir cap benefici pel projecte realitzat, en aquest cas sí que l'enginyer haurà de cobrar pel servei realitzat i que alhora és la seva feina. La **Taula 4** mostra els resultats obtinguts per un sou de l'enginyer de 35 €/h que s'adequa amb el sou que contempla les despeses d'aquest (transport, el seu servei com a treballador...).

Concepte	Nombre	Hores (h)	Preu/hora (€/h)	Total (€)
Treballadors	1	600	35	21000
Total	-	-	-	21000

**Taula 4.** Cost del personal que ha realitzat el projecte.

#### 2.1.2. Costos d'oficina

Per disposar d'una enginyeria o qualsevol altre tipus de negoci es requereix una oficina o despatx on dur a terme el projecte, a diferència del cas 1 on la zona de treball sol ser casa seva, la universitat o biblioteques. En aquest cas es considera el cost atribuït a l'espai ocupat per l'enginyer que està realitzant el projecte sense tenir en consideració si hi ha altres enginyers o no treballant en altres afers. Per tant els 350 € de lloguer i els que es considerin d'altres que en deriven (electricitat,

climatització, neteja i manteniment de l'establiment...) són considerats únicament com la part que li correspon a l'enginyer en qüestió. Finalment, aquests valors s'escriuen a la **Taula 5**.

Concepte	Preu mensual (€/mes)	Preu total (€)
Lloguer	350	1400
Electricitat	55	220
Climatització	30	120
Neteja i manteniment	40	160
Altres	20	80
Total	495	1980

**Taula 5.** Costos de l'oficina durant la duració del projecte (4 mesos).

### 2.1.3. Costos de legalització del comerç

Realitzar una activitat lucrativa requereix el compliment de molts permisos i el pagament d'impostos i taxes necessari per poder mantenir obert el comerç i seguir cobrant pels serveis realitzats en aquest. Es pot considerar el cas on l'enginyer treballa com a autònom i el cas com que aquest forma part d'una societat anònima. Vist que sortirà més barat considerar l'enginyer com a treballador autònom, es fa únicament aquesta consideració.

Per ser autònom cal fer algunes consideracions:

- El treballador ha superat l'etapa d'autònom jove, que hauria de pagar 50 € al mes, per considerar-se un autònom adult que paga el preu complet igual a 260 € al mes (lo mínim).
- Al ser professional, s'aplica una retenció del IRPF del 7 %.
- Al ser professional, es cobra un IVA del 21 %. La retenció del IRPF anterior es resta als costos, mentre que l'IVA es suma.
- El benefici, entès com la que representa que has ingressat menys el que has pagat d'impostos, té aplicada una nova retenció del IRPF 20 %.

En els costos que es poden veure a la **Taula 6** estan aproximats tenint en compte aquestes consideracions.

Concepte	Preu mensual (€/mes)	Preu total (€)
Totalitat de despeses per ser autònom (Taxes incloses).	260	1040
Consultoria	70	280
Total	330	1320

**Taula 6.** Costos de ser autònom durant el temps que es realitza el projecte (4 mesos).

## 2.3. Material

Per últim, cal analitzar de nou els costos de material però ara tenint en compte que tots els costos els ha de fer front l'enginyeria en qüestió. D'aquesta forma es podrà veure quin és el cost final de realitzar aquest projecte tenint en compte els paràmetres més important associats a tots els elements que tenen una despesa.

Cap recordar que el material es basa tant en material físic (hardware en cas d'ordinadors, llibres emprats...) i en material informàtic (programes, softwares necessaris per desenvolupar el projecte). Aquests últim s'ha vist a la **Taula 2** que poden tenir costos molt elevats (especialment els programes especialitzats en l'enginyeria com és el COMSOL Multiphysics®), ara no seran pagats per la universitat de l'estudiant ni es podran obtenir llicències gratuïtes, sinó que l'enginyeria n'haurà de fer front el cost.

La **Taula 7** mostra un recopilatori dels costos de tots els materials emprats.

Material físic requerit			
Component	Un. (u)	Cost/un. (€/u)	Cost (€)
Ordinador*	1	100	100
Material informàtic requerit			
Component	Un. (u)	Cost/un. (€/u)	Cost (€)
Llicència Office (Excel, MSWord...)	1	10/mes	40
Llicència COMSOL Multiphysics®	1	1438,5/any	1438,5
Llicència Adobe	1	12,09/mes	48,36
Accés bases de dades (IEEE, Engineering Village...)	-	400/any *	400
Total	-	-	2026,86 €

**Taula 7.** Costos dels diversos materials requerits per dur a terme el projecte en 4 mesos, cas 2.

(\*) Mateixa consideració presa per les caselles afectades que la que s'ha pres a la **Taula 2**.

## 2.4. Sumari

En aquest apartat es mostra la suma per acabar obtenint el cost total associat al desenvolupament del projecte en el cas 2. La **Taula 8** mostra els resultats.

Concepte	Cost (€)
Costos de personal	21000
Costos d'oficina	1980
Costos de legalització del comerç	1320
Costos de material	2026,86
Total	26326,86

**Taula 8.** Sumari dels costos cas 2, (projecte de 4 mesos).

Aquest serien els costos totals aproximats de realitzar l'estudi plantejat en aquest projecte.



## Bibliografia

1. GEA. *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future* [en línia]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: 2012. ISBN 9781 10700 5198 hardback 9780 52118 2935 paperback. Disponible a: <http://www.globalenergyassessment.org>.
2. Seyboth, K. et al. *Renewables 2016 Global Status Report* [en línia]. 2016. ISBN 978-3-9818107-0-7. DOI ISBN 978-3-9818107-0-7. Disponible a: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>.
3. IEA. Energy and Climate Change. A: *World Energy Outlook Special Report*. 2015, p. 1-200. ISSN 1476-4687. DOI 10.1038/479267b.
4. Data and Statistics - IRENA REsource. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=6&subTopic=11>.
5. Wind energy. A: */wind* [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://www.irena.org/wind>.
6. *Global Atlas for Renewable Energy* [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <https://irena.masdar.ac.ae/GIS/?map=103>.
7. *Google Earth* [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>.
8. El manto y el núcleo de la Tierra. A: [1] "El manto y el núcleo de la Tierra." [Online]. Available: <http://www.astromia.com/tierraluna/mantonucleo.htm>. [Accessed: 24-May-2018]. [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://www.astromia.com/tierraluna/mantonucleo.htm>.
9. Núcleo de la Tierra. A: [en línia]. Disponible a: [https://es.wikipedia.org/wiki/Núcleo\\_de\\_la\\_Tierra](https://es.wikipedia.org/wiki/Núcleo_de_la_Tierra).
10. El mecanismo que más influye en la deformación del manto terrestre no es el creído - Magnética 107.1 FM. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://www.magneticafm.com/2016/07/11/el-mecanismo-que-mas-influye-en-la-deformacion-del-manto-terrestre-no-es-el-creido/>.
11. Magma. A: [en línia]. Disponible a: <https://es.wikipedia.org/wiki/Magma>.
12. Las 8 Partes de un Volcán Más Importantes - Lifeder. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <https://www.lifeder.com/partes-volcan/>.
13. Scientists Hatch Bold Plan to Save Planet From Supervolcano. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <https://www.nbcnews.com/mach/science/scientists-hatch-bold-plan-save-planet-supervolcano-ncna799166>.
14. Parque Nacional de Timanfaya: visitar el Parque Nacional de Timanfaya. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a:

[http://www.españaescultura.es/es/espacios\\_naturales/parque\\_nacional\\_de\\_timanfaya.html](http://www.españaescultura.es/es/espacios_naturales/parque_nacional_de_timanfaya.html).

15. Presa Eléctrica De La Potencia Hidráulica Foto de archivo - Imagen de desierto, rojo: 7266764. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <https://es.dreamstime.com/imagenes-de-archivo-presa-eléctrica-de-la-potencia-hidráulica-image7266764>.

16. Treball de Final de Grau - Smartsheet.com. A: [en línia]. [Consulta: 28 maig 2018]. Disponible a: <https://app.smartsheet.com/b/home>.

17. LaGeo - Energía Geotermica en El salvador, centrales. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://www.lageo.com.sv/?cat=1009>.

18. Geothermal Power Plants - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy - Energy Information Administration. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: [https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=geothermal\\_power\\_plants](https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=geothermal_power_plants).

19. Electricity Generation | Department of Energy. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <https://www.energy.gov/eere/geothermal/electricity-generation>.

20. Geothermal power plants - Energy Education. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: [http://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal\\_power\\_plants](http://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal_power_plants).

21. Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo – El Periodico de la Energía | El Periodico de la Energía con información diaria sobre energía eléctrica, eólica, renovable, petróleo y gas, mercados y legislación energética. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>.

22. Etiopía construye la mayor central geotérmica del mundo | geotermiaonline. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://geotermiaonline.com/2013/10/etiopia-construye-la-mayor-central-geotermica-del-mundo/>.

23. Ou, G. i Einav, I. Fluid temperature and power estimation of geothermal power plants by a simplified numerical model. A: *Proceedings - 2010 WASE International Conference on Information Engineering, ICIE 2010*. 2010, Vol. 4, p. 250-254. DOI 10.1109/ICIE.2010.350.

24. Trillo, G.L. i Angullo, V.R. Guía de la Energía Geotérmica. A: *Universidad Politécnica de Madrid* [en línia]. 2008, p. 178. Disponible a: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-geotermica.pdf>.

25. Fridleifsson, Ingvar B.; Bertani, Ruggero; Huenges, Ernst; Lund, John W.; Ragnarsson, Arni; Rybach, L. (2008-02-11). O.H. ;T. T. "The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change". A: 2009. Luebeck, Germany.: p. 59–80.

26. Explotacion de gas natural « La Otra Opinión. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://laotraopinion.net/recursos-naturales/futuro-del-gas-natural/explotacion-de-gas/>.

27. Aldred, W. i Crockett, B. Una nueva forma de perforar Los sistemas de perforación automatizados mitigan el riesgo ocasionado al personal. A: . 1956, p. 48-55.

28. Jardon, M. i Harcourt, P. Nuevos aspectos de la construcción de pozos multilaterales. A: *Oilfield*

Review. 2003, Vol. 8, núm. 3, p. 56-75.

29. Ciencia y Tecnología: Perforación direccional en un pozo de petróleo | AulaFacil.com: Los mejores cursos gratis online. A: [en línea]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://www.aulafacil.com/articulos/ciencia-y-tecnologia/t1213/perforacion-direccional-en-un-pozo-de-petroleo>.

30. Tipo de rocas. A: [en línea]. Disponible a: [https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Tipos\\_de\\_rocas](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Tipos_de_rocas).

31. Tipos de Rocas - Información y Características - Geografía. A: [en línea]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://www.geoenciclopedia.com/tipos-de-rocas/>.

32. Edafología. A: [en línea]. Disponible a: <https://es.wikipedia.org/wiki/Edafologia>.

33. Roca madre. A: [en línea]. Disponible a: [https://es.wikipedia.org/wiki/Roca\\_madre](https://es.wikipedia.org/wiki/Roca_madre).

34. Aramberri, H., Rurali, R. i Íñiguez, J. Thermal conductivity changes across a structural phase transition: The case of high-pressure silica. A: *Physical Review B* [en línea]. American Physical Society, 2017, Vol. 96, núm. 19, p. 195201. ISSN 2469-9950. DOI 10.1103/PhysRevB.96.195201. [Consulta: 15 maig 2018]. Disponible a: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.96.195201>.

35. Jäckel, M., Wagner, K. i Hegenbarth, E. Low-temperature thermal conductivity of vitreous silica under high pressure. A: *Physica B: Condensed Matter*. 1996, Vol. 219-220, núm. 1-4, p. 308-310. ISSN 09214526. DOI 10.1016/0921-4526(95)00729-6.

36. Harris, R.N. BEARDSMORE, G. R. CULL, J. P. 2001. Crustal Heat Flow. A Guide to Measurement and Modelling. x + 324 pp. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press. Price 70.00, US \$100.00 (hard covers), 24.95, US \$37.95 (paperback). ISBN 0 521 79289 4; 0 521 79703 9 (pb). A: *Geological Magazine* [en línea]. Cambridge University Press, 2003, Vol. 140, núm. 3, p. S0016756803348022. ISSN 00167568. DOI 10.1017/S0016756803348022. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: [http://www.journals.cambridge.org/abstract\\_S0016756803348022](http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0016756803348022).

37. Čermák, V. i Rybach, L. *Thermal Conductivity and Specific Heat of Minerals and Rocks*. 1982. 1982.

38. Davis, M.G. et al. Thermal conductivity anisotropy of metasedimentary and igneous rocks. A: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2007, Vol. 112, núm. 5, p. 1-7. ISSN 21699356. DOI 10.1029/2006JB004755.

39. Mottaghy, D., Vosteen, H.D. i Schellschmidt, R. Temperature dependence of the relationship of thermal diffusivity versus thermal conductivity for crystalline rocks. A: *International Journal of Earth Sciences*. 2008, Vol. 97, núm. 2, p. 435-442. ISSN 14373254. DOI 10.1007/s00531-007-0238-3.

40. Magma Chamber. A: [en línea]. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/Magma\\_chamber](https://en.wikipedia.org/wiki/Magma_chamber).

41. Huang, H.-H. et al. The Yellowstone magmatic system from the mantle plume to the upper crust. A: *Science* [en línea]. 2015, Vol. 348, núm. 6236, p. 773-776. DOI 10.1126/science.aaa5648. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.aaa5648>.

42. How large is the magma chamber that is currently under Yellowstone? A: [en línea]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <https://www.usgs.gov/faqs/how-large-magma-chamber-currently-under->



yellowstone?qt-news\_science\_products=0#qt-news\_science\_products.

43. Gudmundsson, A. Magma chambers: Formation, local stresses, excess pressures, and compartments. A: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* [en línia]. Elsevier B.V., 2012, Vol. 237-238, p. 19-41. ISSN 03770273. DOI 10.1016/j.jvolgeores.2012.05.015. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.05.015>.

44. Eppelbaum, L., Kutasov, I. i Pilchin, A. *Applied Geothermics* [en línia]. 2014. ISBN 978-3-642-34022-2. DOI 10.1007/978-3-642-34023-9. Disponible a: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-34023-9>.

45. Annen, C. et al. Quantification of the intrusive magma fluxes during magma chamber growth at soufrière hills volcano (montserrat, Lesser Antilles). A: *Journal of Petrology*. 2014, Vol. 55, núm. 3, p. 529-548. ISSN 00223530. DOI 10.1093/petrology/egt075.

46. Incropera, F.P. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* [en línia]. Wiley, 2013. ISBN 9780470646151. Disponible a: <https://books.google.es/books?id=oC39tgAACAAJ>.

47. Mecánica de fluidos: introducción. A: [en línia]. [Consulta: 29 maig 2018]. Disponible a: <https://www.slideshare.net/andrsalans/mecnica-de-fluidos-introduccin>.

48. Ciclo de Rankine. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://2.bp.blogspot.com/-L4mnQNh4dg/VkKv7IGOCNI/AAAAAAAAAIE/7W2jxyXMAfQ/s1600/olp%257Bk%252Cokl.png>.

49. diferentes tipos de evaporadores. A: [en línia]. [Consulta: 28 maig 2018]. Disponible a: [https://es.slideshare.net/jeanneth3000/riferentes-tipos-de-evaporadores?next\\_slideshow=1](https://es.slideshare.net/jeanneth3000/riferentes-tipos-de-evaporadores?next_slideshow=1).

50. Torre de refrigeración. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/Torre.htm>.

51. Martin N. Cerda, Tecnico en Refrigeración: Torres de enfriamiento. A: [en línia]. [Consulta: 24 maig 2018]. Disponible a: <http://martinfix.blogspot.com.es/2012/12/torres-de-enfriamiento.html>.

52. IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary* [en línia]. 2014. ISBN 9781107415416. DOI 10.1017/CBO9781107415416.005. Disponible a: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415416A011>.